



TUGAS AKHIR - TF 141581

**ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN INFLUEN
TERHADAP KONSENTRASI BAKTERI EFLUEN
PADA REAKTOR BIOGAS *UPFLOW*
ANAEROBIC SLUDGE BLANKET (UASB)**

**SURYA ALAM
NRP. 2413 100 032**

**Dosen Pembimbing:
Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017**

Halaman ini sengaja dikosongkan



FINAL PROJECT - TF 141581

ANALYSIS OF INFLUENT FLOW RATE EFFECT ON EFFLUENT BACTERIA CONCENTRATION ON AN UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET (UASB) BIOGAS REACTOR

SURYA ALAM
NRP. 2413 100 032

Supervisor :
Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D

ENGINEERING PHYSICS DEPARTMENT
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

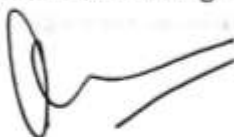
**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN INFLUEN
TERHADAP KONSENTRASI BAKTERI EFLUEN PADA
REAKTOR BIOGAS UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE
BLANKET (UASB)**

Oleh:
Surva Alam
NRP. 2413 100 032

Surabaya, 15 Juni 2017

Menyetujui,
Dosen Pembimbing I



Gunawan Nugroho, S.T, M.T., Ph.D
NIPN. 197711272002121002

Mengetahui,
Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS



Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D.
NIPN. 197809022003121002

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN INFLUEN
TERHADAP KONSENTRASI BAKTERI EFLUEN PADA
REAKTOR BIOGAS UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE
BLANKET (UASB)**

TUGAS AKHIR




Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada

Bidang Studi Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan
Program Studi S-1 Departemen Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

SURYA ALAM
NRP. 2413 100 032

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D | 
..... (Pembimbing I) |
| 2. Dr. Ridho Hantoro, S.T., M.T., | 
..... (Penguji I) |
| 3. Ir. Roekmono., M.T | 
..... (Penguji II) |
| 4. Dr. Dhany Arifianto, S.T., M. Eng, | (Penguji III) |

SURABAYA
JUNI, 2017

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Surya Alam

NRP : 2413100032

Departemen : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN INFLUEN TERHADAP KONSENTRASI BAKTERI EFLUEN PADA REAKTOR BIOGAS UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET (UASB) adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 15 Juni 2017
yang membuat pernyataan,

Surya Alam

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALISIS PENGARUH LAJU ALIRAN INFLUEN
TERHADAP KONSENTRASI BAKTERI EFLUEN PADA
REAKTOR BIOGAS *UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE
BLANKET* (UASB)**

Nama Mahasiswa : Surya Alam
NRP : 2413100032
Jurusan : Teknik Fisika FTI – ITS
Dosen Pembimbing : Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D

Abstrak

Limbah organik berupa zat cair merupakan limbah yang tidak dapat dihindarkan dari sisa produksi industri pangan. Menurut PP no 82 tahun 2001 pasal 8 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup, terdapat beberapa parameter yang digunakan untuk menentukan kualitas air, di antaranya COD (*Chemical Oxygen Demand*). Kandungan COD yang tinggi pada limbah organik cair dapat mengganggu ekosistem perairan dan merusak atmosfer bumi. Untuk itu kandungan COD dapat dikurangi dengan reaktor UASB yang menghasilkan biogas. Namun terdapat masalah dalam penggunaan reaktor UASB yaitu banyaknya bakteri dalam bentuk granul yang terbuang bersama dengan efluen. Pada tugas akhir ini dilakukan studi pengaruh laju aliran influen terhadap kandungan biomassa yang terbuang untuk menentukan laju aliran yang tepat. Untuk melakukan studi, dilakukan estimasi parameter kinetika Monod untuk biomassa yang terdapat pada reaktor pemodelan reaktor UASB sebagai CSTR bertingkat, dan pemodelan reaktor UASB distributif menurut ketinggian reaktor. Laju aliran influen yang baik untuk reaktor UASB PT. GGF diperoleh pada rentang berkisar 150 hingga 175 m³/h, di mana tidak terlalu banyak konsentrasi bakteri yang terbuang (0,001393 s.d 0,4919 kg/m³), waktu mencapai *steady state* yang tidak terlalu lama (48.640 s.d. 60.800 hari), COD removal yang cukup baik, yaitu sebesar 57,81% s.d. 66, 57% saat pertama kali mencapai HRT dan 97,74% s.d. 97,98% saat mencapai *steady state*.

Kata Kunci: Biomassa, *Chemical Oxygen Demand*, Reaksi Anaerobik, Reaktor UASB

Halaman ini sengaja dikosongkan

**ANALYSIS OF INFLUENT FLOW RATE EFFECT ON
EFFLUENT BACTERIA CONCENTRATION ON AN
UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET (UASB)
BIOGASS REACTOR**

Name of Student : Surya Alam
NRP : 2413100032
Department : Teknik Fisika FTI – ITS
Advisor : Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D

Abstract

Organic liquid waste is an inevitable waste of the food production from food industries. According to Government Regulation No. 82 year 2001 clause 8 on Environmental Management, there are several parameters used to determine water quality, including COD (Chemical Oxygen Demand). High COD content in liquid organic waste can disrupt aquatic ecosystems and damage the earth's atmosphere. For that COD content can be reduced by UASB reactor that produces biogas. However there was a problem in the use of UASB reactor that was the number of bacteria in the form of granules that are wasted along with the effluent during the process. In this final project, a study of the effect of the influent flow rate on the biomass concentration which is wasted was conducted to determine the optimal flow rate. To conduct the study, an estimation of the Monod parameters for biomass in the UASB reactor, modeling reactor as a multilevel CSTR, and UASB reactor modeling according to the reactor height were conducted. The suitable flow rate for UASB reactor in GGF Corp. was obtained in the range of 150 to 175 m³/h, where there were less bacterial concentration in the effluent (0.001393 to 0.4919 kg / m³), the time to reach the steady state did not take too long compared with other variations (48,640 to 60,800 days), COD Removal was adequate for biogas production and microbial growth, that is equal to 57,81% to 66, 57% when first reached HRT and 97,74% to 97.98% when reaching steady state.

Keywords : Anaerobic Reaction, Biomass, Chemical Oxygen Demand, UASB Reactor

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Tuhan yang Maha Esa karena atas berkat dan rahmat-Nya penulis bisa menyelesaikan laporan Tugas Akhir ini.

Selain itu tak lupa saya mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Agus Muhammad Hatta, S.T., M.Si., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika - ITS
2. Bapak Hendra Cordova, S.T, M.T. selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Fisika – ITS
3. Bapak Gunawan Nugroho, S.T., M.T., Ph.D selaku dosen pembimbing dan Kepala Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengondisian Lingkungan Teknik Fisika - ITS
4. Bapak Edi Sukamto selaku Manager Power Plant di PT. Great Giant Food Terbanggi Besar, Lampung Tengah
5. Bapak Suharyanto selaku kepala bagian Biogas
6. Bapak Syahroni dan Bapak Supriyono selaku pembimbing lapangan di PT. Great Giant Food
7. Keluarga Ibu Nengah Sukamto yang telah sangat banyak membantu penulis dalam pengambilan data dan akomodasi selama di Lampung Tengah
8. Bapak Raul Rodriguez Gomez, Ph.D yang telah membantu pemahaman pemodelan reaktor UASB
9. Seluruh pihak yang terlibat dalam penulisan Tugas Akhir ini dan tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun. Akhir kata, semoga tulisan ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Penulis

Surya Alam
(2413100032)

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PENGESAHAN I	v
LEMBAR PENGESAHAN II.....	vii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI.....	ix
ABSTRAK	xi
<i>ABSTRACT</i>	xiii
KATA PENGANTAR.....	xv
DAFTAR ISI	xvii
DAFTAR GAMBAR	xxi
DAFTAR TABEL	xxvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Sistematika Laporan.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Tahapan Produksi Biogas.....	5
2.1.1 Hidrolisis	7
2.1.2 Acidfikasi	7
2.1.3 Metanogenesis	7
2.2 Reaktor Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)	8
2.3 Faktor yang Mempengaruhi Performansi Reaktor UASB	10
2.4 Kinetika Reaksi.....	11
2.5 Model Monod.....	14

2.6 Persamaan Perpindahan Massa	16
BAB III METODOLOGI	19
3.1 Studi Literatur	20
3.2 Pengambilan Data Plant Biogas PT Great Giant Food	21
3.3 Estimasi Kinetika Reaksi Bakteri dengan Metode Regresi Linier Sederhana	21
3.4 Simulasi Kinetika Reaksi dengan Model Pendahuluan Reaktor UASB	24
3.5 Validasi Model Pendahuluan	28
3.6 Simulasi Model Utama (Model Konsentrasi Bakteri dan Substrat pada Reaktor UASB sebagai Fungsi Ketinggian dan Waktu)	31
3.7 Validasi Model Utama	32
3.8 Mengaplikasikan Variasi Laju Aliran Influen pada Model Pendahuluan dan Model Utama	33
3.9 Analisis Data	34
3.10 Penyusunan Laporan	35
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN	37
4.1 Estimasi Parameter Monod	37
4.2 Validasi Model Pendahuluan	38
4.3 Validasi Model Utama	42
4.4 Simulasi Model Pendahuluan dan Model Utama dengan Variasi Laju Aliran Influen	47
4.4.1 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=50\text{m}^3/\text{h}$	47
4.4.2 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=75\text{ m}^3/\text{h}$	51
4.4.3 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=100\text{ m}^3/\text{h}$	55
4.4.4 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=125\text{ m}^3/\text{h}$	59
4.4.5 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=150\text{m}^3/\text{h}$	63

4.4.6 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=175\text{m}^3/\text{h}$	66
4.4.7 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=200\text{ m}^3/\text{h}$	71
4.4.8 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=225\text{ m}^3/\text{h}$	75
4.4.9 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=250\text{ m}^3/\text{h}$	79
4.5 Analisis Perbandingan Variasi Simulasi	83
4.5.1 Pengaruh Laju Aliran terhadap COD <i>Removal</i> ketika HRT Tercapai	83
4.5.2 Pengaruh Laju Aliran terhadap COD <i>Removal</i> ketika <i>Steady State</i> Tercapai	84
4.5.3 Pengaruh Laju Aliran terhadap Waktu menuju <i>Steady</i> <i>State</i>	85
4.5.4 Pengaruh Laju Aliran terhadap Konsentrasi Biomassa pada Efluen.....	86
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	89
5.1 Kesimpulan	89
5.2 Saran	89
DAFTAR PUSTAKA.....	90
LAMPIRAN A	91
LAMPIRAN B	95
LAMPIRAN C	99
LAMPIRAN D	103
LAMPIRAN E.....	115
BIODATA PENULIS.....	133

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Degradasi Anaerobik Suatu Material Polimer Kompleks (Seghezzo et al. 2004). Angka romawi mengindikasikan: I. bakteri fermentasi, II. Bakteri asetogenesis penghasil hidrogen, III. Bakteri asetogenesis pengonsumsi bakteri, IV. Metanogen pengurang karbon dioksida, V. Metanogen asetilastik	6
Gambar 2.2	Konservasi Massa untuk Volume Kontrol (Incropera & Dewitt 2011)	16
Gambar 2.3	Perpindahan Massa akibat Dispersi, Adveksi, dan Reaksi.....	17
Gambar 3.1	Diagram Alir Tugas Akhir	20
Gambar 3.2	Reaktor UASB Dimodelkan sebagai CSTR bertingkat	26
Gambar 3.3	Set-up Simulasi Satu Reaktor dengan Simulink	29
Gambar 3.4	Set-up Simulasi 14 Reaktor.....	30
Gambar 4.1	Regresi Linier untuk Estimasi K_d dan Y	37
Gambar 4.2	Perubahan nilai μ_{max} terhadap waktu	38
Gambar 4.3	Perubahan Konsentrasi Substrat terhadap Waktu dengan Parameter dan Kondisi Operasi Reaktor UASB PT. GGF.....	39
Gambar 4.4	Perubahan Konsentrasi Substrat terhadap Waktu dengan Perbesaran pada 20 jam Pertama.....	39
Gambar 4.5	Perubahan Konsentrasi Biomassa terhadap Waktu dengan Kondisi Operasi dan Parameter Reaktor UASB PT. GGF.....	40
Gambar 4.6	Perbandingan Perubahan Konsentrasi Biomassa dan Konsentrasi COD Removal terhadap Waktu	42
Gambar 4.7	Respon Profil Substrat pada Waktu Operasi yang Berbeda.....	43
Gambar 4.8	Respon Profil Biomassa pada Waktu Operasi yang Berbeda.....	44

Gambar 4. 10	Perbandingan Konsentrasi Biomassa Hasil Simulasi dan Data Plant pada Waktu Operasi 240 hari	45
Gambar 4. 11	Perbandingan Konsentrasi Biomassa Hasil Simulasi dan Data Plant pada Waktu Operasi 320 hari.....	45
Gambar 4. 12	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 50 m ³ /h	48
Gambar 4. 13	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 50 m ³ /h pada 50 jam Pertama.....	48
Gambar 4. 14	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 50 m ³ /h	49
Gambar 4. 15	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran 50 m ³ /h.....	50
Gambar 4. 16	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 50 m ³ /h.....	50
Gambar 4. 17	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 75 m ³ /h	51
Gambar 4. 18	Respon Profil Konsentrasi Substrat Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 75 m ³ /h pada 35 jam Pertama.....	52
Gambar 4. 19	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 75 m ³ /h	53
Gambar 4. 20	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran 75 m ³ /h.....	54
Gambar 4. 21	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 75 m ³ /h.....	54
Gambar 4. 22	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 100 m ³ /h.....	55
Gambar 4. 23	Respon Profil Konsentrasi Substrat Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 100 m ³ /h pada 30 jam Pertama	56
Gambar 4. 24	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 100 m ³ /h.....	57

Gambar 4. 25	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran 100 m ³ /h.....	58
Gambar 4. 26	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 100 m ³ /h.....	58
Gambar 4. 27	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 125 m ³ /h.....	59
Gambar 4. 28	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 125 m ³ /h untuk 25 jam Pertama	60
Gambar 4. 29	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 125 m ³ /h.....	61
Gambar 4. 30	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 125 m ³ /h.....	62
Gambar 4. 31	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 125 m ³ /h.....	62
Gambar 4. 32	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 150 m ³ /h.....	63
Gambar 4. 33	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 150 m ³ /h untuk 20 jam Pertama	64
Gambar 4. 34	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 150 m ³ /h.....	65
Gambar 4. 35	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran 150 m ³ /h.....	66
Gambar 4. 36	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 150 m ³ /h.....	66
Gambar 4. 37	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 175 m ³ /h.....	67
Gambar 4. 38	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 175 m ³ /h untuk 20 jam Pertama	68
Gambar 4. 39	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 175 m ³ /h.....	69
Gambar 4. 40	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran 175 m ³ /h.....	70

Gambar 4. 41	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 175 m ³ /h.....	70
Gambar 4. 42	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 200 m ³ /h.....	71
Gambar 4. 43	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 200 m ³ /h untuk 25 jam Pertama	72
Gambar 4. 44	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 200 m ³ /h.....	73
Gambar 4. 45	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 200 m ³ /h.....	74
Gambar 4. 46	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 200 m ³ /h.....	74
Gambar 4. 47	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 225 m ³ /h.....	75
Gambar 4. 48	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 225 m ³ /h untuk 20 jam Pertama	76
Gambar 4. 49	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 225 m ³ /h.....	77
Gambar 4. 50	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran 225 m ³ /h.....	78
Gambar 4. 51	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 225 m ³ /h.....	78
Gambar 4. 52	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 250 m ³ /h.....	79
Gambar 4. 53	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 250 m ³ /h untuk 20 jam Pertama	80
Gambar 4. 54	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 250 m ³ /h.....	81
Gambar 4. 55	Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran 250 m ³ /h.....	82
Gambar 4. 56	Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran 250 m ³ /h.....	82

Gambar 4. 57 Pengaruh Laju Aliran terhadap COD Removal saat HRT Tercapai	83
Gambar 4. 58 Pengaruh Laju Aliran terhadap COD Removal ketika Steady State Tercapai	84
Gambar 4. 59 Pengaruh Laju Aliran terhadap Waktu menuju Steady State	85
Gambar 4. 60 Pengaruh Laju Aliran Influen terhadap Konsentrasi Biomassa Efluen pada Steady State	86

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1 Parameter Kinetika Reaksi	28
Tabel 3.2 Parameter Model Utama	32
Tabel 3.3 Variasi laju aliran influen pada model pendahuluan ..	33
Tabel 3.4 Variasi laju aliran influen pada model utama	33

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Limbah organik berupa zat cair merupakan limbah yang tidak dapat dihindarkan dari sisa produksi industri pangan. Jika limbah cair organik tidak diolah dengan baik sebelum dibuang ke lingkungan sekitar, maka dapat berdampak pada pencemaran lingkungan utamanya perairan. Menurut PP no 82 tahun 2001 pasal 8 tentang Pengelolaan Lingkungan Hidup, terdapat beberapa parameter yang digunakan untuk menentukan kualitas air, antaranya COD (Chemical Oxygen Demand), BOD (Biochemical Oxygen Demand), DO (Dissolved Oxygen), dan jumlah total zat terlarut. Kandungan COD yang tinggi pada limbah organik cair dapat mengganggu ekosistem perairan sebab air dengan COD yang tinggi akan mengonsumsi oksigen di dalam, jika COD terdegradasi secara aerobik, dapat menghasilkan CO₂ dan endapan, dan jika terdegradasi secara anaerobik, dapat menghasilkan gas metan (Chetty & Pillay, 2015) yang merusak atmosfer bumi.

Reaktor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) merupakan salah satu jenis reaktor biogas yang digunakan untuk mengolah limbah cair organik dengan efisiensi yang tinggi yaitu 70-90% (Wagiman, 2007). Dalam prosesnya, reaktor UASB menggunakan bakteri metanogen yang terkumpul membentuk granul sebagai media untuk menguraikan COD menjadi gas metan dan CO₂ sehingga gas metan dapat dikumpulkan dan digunakan sebagai bahan bakar untuk berbagai kepentingan.

Salah satu dari 10 reaktor UASB di Indonesia (Karthikeyan & Kandasamy 2009) yang digunakan oleh PT. Great Giant Food mampu memproduksi sebanyak 30.000 Nm³ gas metan per hari dengan masukan berupa limbah cair tapioka dan nanas. Hasil biogas ini kemudian digunakan untuk membakar singkong utk proses produksi tapioka dan sebagai bahan bakar PLTU di sana. Namun terdapat masalah yang dihadapi, yaitu banyaknya bakteri dalam bentuk granul yang terbuang bersama dengan limbah yang telah diolah dalam reaktor yang memiliki kandungan COD yang

rendah (efluen). Adapun bakteri yang terbuang bersama efluen pada umumnya merupakan bakteri yang telah mati, bakteri yang di dalamnya mengandung gas sehingga terangkat ke atas, ataupun bakteri yang terbawa oleh aliran masuk (influen) yang terlalu tinggi (Gómez, 2011). Sebagai hipotesis, diperkirakan banyaknya nilai bakteri yang terbuang diakibatkan oleh laju aliran influen yang terlalu tinggi. Pada penelitian sebelumnya Bolle dkk, telah dilakukan studi eksperimental untuk mengetahui hubungan laju aliran dan ketinggian reaktor agar tidak terjadi *short circuit flow* yang berakibat pada tidak terolahnya substrat dalam limbah cair (Bolle et al., 1986). Namun pada penelitian tersebut tidak ditinjau pengaruhnya terhadap konsentrasi substrat dan bakteri. Sedangkan model matematis untuk reaktor UASB yang lebih lengkap telah dikembangkan oleh Kalyuzhnyi dkk, yaitu model hidrodinamika reaktor, kinetika reaksi, psycho-chemical dan perpindahan massa guna mengetahui kinetika reaksi dari berbagai macam reaksi dengan mempertimbangkan perbedaan waktu tinggal substrat (HRT) dalam reaktor UASB (Kalyuzhnyi & Fedorovich, 1997). Namun hubungan aliran laju influen dengan kinetika reaksi belum dideskripsikan pada penelitian ini. Untuk itu, pada tugas akhir ini akan dilakukan pemodelan untuk mempelajari dan menganalisa pengaruh laju aliran influen dengan dimensi reaktor UASB yang tersedia terhadap nilai konsentrasi bakteri pada efluen. Melalui tugas akhir ini, diharapkan dapat menghasilkan rekomendasi laju aliran yang sesuai untuk berbagai reaktor UASB.

1.2 Rumusan Masalah

Dari paparan latar belakang diatas, maka permasalahan dari pelaksanaan program ini adalah sebagai berikut :

1. Bagaimana perilaku kinetika bakteri, konsentrasi substrat dan aliran dalam reaktor UASB?
2. Bagaimana pengaruh laju aliran influen terhadap konsentrasi bakteri yang terbuang bersama efluen?
3. Bagaimana laju aliran influen yang optimal untuk reaktor UASB?

1.3 Tujuan

Berdasarkan pemaparan latar belakang dan rumusan masalah di atas tujuan dari pelaksanaan program ini adalah sebagai berikut:

1. Memahami perilaku kinetika bakteri, konsentrasi substrat dan aliran dalam reaktor UASB.
2. Mengetahui pengaruh aliran masukan terhadap konsentrasi bakteri yang terbangun.
3. Mengetahui laju aliran influen yang optimal untuk reaktor UASB

1.4 Batasan Masalah

Adapun cakupan penyelesaian masalah yang akan dibahas pada penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Memodelkan kinetika bakteri, konsentrasi substrat dan hubungannya dengan laju aliran influen.
2. Simulasi dan perhitungan iteratif untuk memahami perilaku yang telah dimodelkan.
3. Parameter yang digunakan pada tugas akhir ini mendekati dengan kondisi reaktor UASB di PT. Great Giant Food.

1.5 Sistematika Laporan

Sistematika penulisan laporan tugas akhir adalah sebagai berikut:

- a. **BAB I PENDAHULUAN**
Pada Bab I ini terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan sistematika laporan.
- b. **BAB II TEORI PENUNJANG**
Pada Bab II ini dibahas mengenai teori-teori yang berkaitan dengan penelitian yang akan dilakukan, seperti teori pemodelan dinamika kapal dan pengendalian PID.
- c. **BAB III METODOLOGI PENELITIAN**
Pada Bab III ini berisi mengenai rancangan dari penelitian yang dilakukan, metode dan langkah-langkah dalam penelitian.
- d. **BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN**
Pada Bab IV ini berisi tentang data hasil penelitian dari estimasi parameter dan kinetika reaksi pada reaktor UASB PT.

GGF, simulasi model pendahuluan, simulasi model utama, serta variasi laju aliran dan analisis menggunakan model pendahuluan dan model utama.

e. **BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

Pada Bab V ini diberikan kesimpulan tentang tugas akhir yang telah dilakukan berdasarkan data-data yang diperoleh, serta diberikan saran sebagai penunjang maupun pengembangan tugas akhir selanjutnya.

BAB II

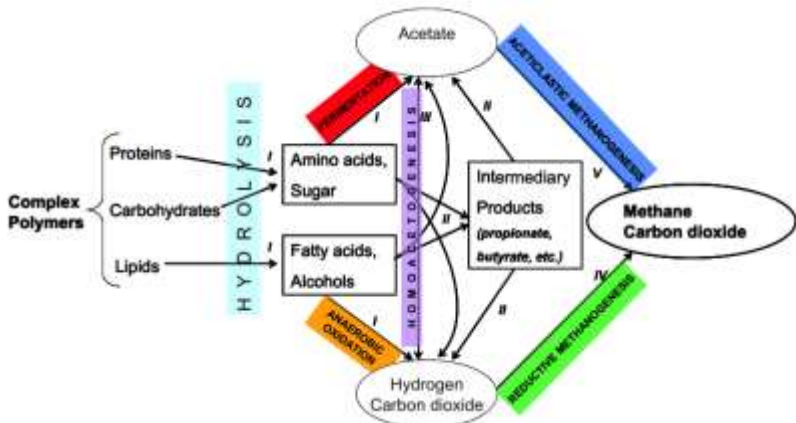
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tahapan Produksi Biogas

COD atau Chemical Oxygen Demand adalah sebuah ukuran oksigen yang dibutuhkan untuk mengoksidasi senyawa atau partikel organik yang dapat larut dalam air. Nilai COD yang tinggi mengindikasikan suatu larutan memiliki nilai cemaran yang tinggi. Namun COD juga dapat diartikan sebagai jumlah substrat yang dapat digunakan untuk memproduksi gas metan. Dengan demikian, nilai COD yang tinggi tidak baik untuk lingkungan, namun baik untuk proses produksi biogas. Satu ton COD ekuivalen dengan 470 m³ gas metan melalui reaksi-reaksi yang terjadi.

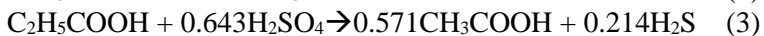
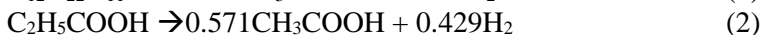
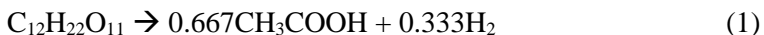
Pada plant biogas di PT. Great Giant Food, digunakan dua jenis campuran limbah, yakni limbah cair nanas dan limbah cair tapioka. Limbah nanas merupakan limbah yang banyak mengandung zat anorganik, mengandung nilai COD (*Chemical Oxygen Demand*) yang rendah, dan kandungan fiber yang tinggi. Sedangkan limbah tapioka mengandung nilai COD yang tinggi, mudah didekomposisi dan mengandung zat organik yang tinggi (mencapai 97%). Dengan demikian, limbah nanas lebih sulit didekomposisi oleh bakteri methanogen dibandingkan dengan limbah cair tapioka.

Menurut Seghezze (2004), terdapat tujuh sub-proses pada proses anaerobik suatu material polimer. Pertama, organik kompleks dihidrolisis, kemudian asam amino dan gula difermentasi. Ketiga, rantai panjang asam lemak dan alkohol dioksidasi. Pada tahap keempat, terjadi oksidasi anaerob dari asam lemak rantai pendek (kecuali asetat). Kelima, asam asetat diproduksi dari karbondioksida dan hidrogen, pada tahap keenam, asam asetat dikonversi menjadi metan. Akhirnya, metan diproduksi oleh reduksi karbon dioksida oleh hidrogen. Berikut ini merupakan gambaran dari reaksi-reaksi yang terjadi:



Gambar 2.1 Degradasi Anaerobik Suatu Material Polymer Kompleks (Seghezzo et al. 2004). Angka romawi mengindikasikan: I. bakteri fermentasi, II. Bakteri asetogenesis penghasil hidrogen, III. Bakteri asetogenesis pengonsumsi bakteri, IV. Metanogen pengurang karbon dioksida, V. Metanogen asetilastik

Sedangkan menurut Kalyuzhnyi & Fedorovich (1997), terdapat urutan reaksi yang disederhanakan ketika limbah influen diolah oleh berbagai bakteri secara anaerobik:



Pada proses (1), merupakan reaksi oleh bakteri fermentasi, pada tahap (2), merupakan reaksi di mana bakteri asetogenik pendegradasi propionat, pada tahap (3), bakteri asetogenik pengurang sulfat berperan, sedangkan pada tahap (4), asam setat diubah menjadi metan dan karbon dioksida, ini merupakan peran

dari bakteri metanogen, pada tahap (5), proses dapat terjadi melalui bakteri asetatotrofik pengurang sulfat, pada tahap (6), bakteri metanogen hidrogenotrofik berperan untuk mengubah hidrogen dan karbon dioksida menjadi gas metan dan air. Pada tahap akhir, bakteri hidrogenotrofik pengurang sulfat berperan untuk mengubah asam sulfat menjadi gas asam sulfida yang merugikan, sehingga sebisa mungkin reaksi ini tidak terjadi.

Meskipun beberapa peneliti melaporkan berbagai tahapan reaksi, secara garis besar, proses pembentukan gas metan dibagi dalam tiga reaksi yang berperan penting, yaitu; hidrolisis, acidifikasi atau pengasaman, dan metanogenesis (Gómez 2011).

2.1.1 Hidrolisis

Hidrolisis adalah proses senyawa-senyawa polisakarida diuraikan menjadi senyawa-senyawa disakarida atau hidro karbon rantai panjang. Pada proses ini, senyawa polisakarida seperti pati, material organik kompleks, protein, dan lemak akan diuraikan menjadi senyawa organik terlarut, asam lemak, gula dan asam amino (Paulo et al. 2015). Pada reaksi ini bakteri yang peran penting adalah bakteri hidrolitik.

2.1.2 Acidifikasi

Reaksi Acidifikasi atau pengasaman adalah reaksi dimana asam-asam rantai panjang terurai menjadi asam rantai pendek atau *Volatile Fatty Acid (VFA)*. VFA atau asam lemak volatil adalah bentuk asam dengan ikatan karbon rantai pendek (CH_6 s.d. CH_{12}). Pada reaksi ini, asam yang paling banyak dihasilkan dan berperan penting dalam reaksi metanogenesis adalah asam cuka atau asam asetat (Paulo et al. 2015).

2.1.3 Metanogenesis

Reaksi metanogenesis adalah reaksi dimana VFA didekomposisi oleh bakteri menjadi gas metan dan karbon dioksida (Paulo et al. 2015). Proses ini terjadi di *methane reactor*.

Terdapat sangat banyak jenis bakteri metanogen yang berperan penting dalam proses metanogenesis. Bakteri metanogen merupakan bakteri yang bekerja secara anaerob.

Bakteri metanogen akan dapat bekerja dengan optimal ketika beberapa kondisi terpenuhi. Kondisi tersebut adalah keasaman atau pH, temperatur *methane reactor*, tepenuhinya mikro dan makronutrisi bagi bakteri, dan tekanan yang sesuai. Keasaman yang optimal bagi bakteri adalah pH 7,0 s.d. 7,2 dengan rentang yang diijinkan 6,5 s.d. 8,0, temperatur yang optimal bagi bakteri adalah 30°C – 35°C. Makronutrisi yang harus dipenuhi bagi bakteri tersebut adalah FeCl_2 , $\text{Ca}(\text{OH})_2$, dan Amonium, sedangkan mikronutrisi bagi bakteri metanogen diperoleh dari limbah nanas dan tapioka.

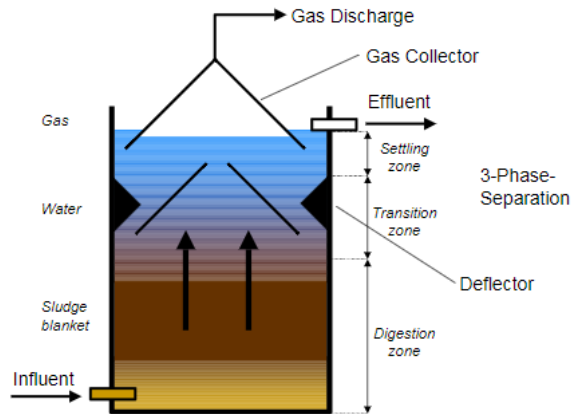
Setelah limbah dimanfaatkan oleh bakteri menjadi gas metan, limbah hasil reaksi metanogenesis mengandung nilai cemaran dan COD yang rendah dan pH yang tinggi. Tingginya nilai pH ini kemudian akan dimanfaatkan oleh *Degasifying Basin* –sebuah tangki yang berperan untuk mempersiapkan limbah cair sebelum masuk ke reaktor UASB –untuk menaikkan pH sebelum masuk ke *methane reactor* sehingga pH di *Degasifying Basin* terjaga netral. Limbah yang tidak kembali ke *Degasifying Basin* kemudian siap dibuang ke kolam pembuangan limbah karena limbah ini sudah memiliki nilai COD yang rendah sehingga aman untuk dibuang ke lingkungan. Pada kolam penampungan (IPAL) nilai COD diuji dan diproses kembali agar sesuai dengan regulasi pemerintah menurut Peraturan Menteri Negara Lingkungan Hidup No. 01 Tahun 2010 yaitu nilai konsentrasi COD yang dibabaskan ke lingkungan maksimal 150 ppm atau 150 mg/L.

2.2 Reaktor Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB)

Reaktor UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) adalah salah satu jenis reaktor biogas yang bekerja secara anaerob. Reaktor jenis ini dikembangkan oleh Lettinga. Sebelum tahun 1970, hanya sedikit peneliti yang tertarik pada pengolahan secara anaerob dan mayoritas peneliti berpikir bahwa pengolahan aerob adalah metode yang terbaik dalam mengolah air limbah. Kemudian, kebutuhan akan UASB meningkat ketika harga minyak bumi meningkat pada tahun

1970. Berikutnya, Lettinga mulai mengembangkan reaktor UASB (Gómez, 2011).

Dalam suatu reaktor UASB, akumulasi dari padatan tersuspensi influen, aktivitas bakteri dan pertumbuhan bakteri mengakibatkan pembentukan lapisan endapan di bagian dasar reaktor, dimana seluruh proses biologis terjadi. Terdapat 2 buah fitur yang menentukan performansi pengolahan, yaitu distribusi limbah cair di dalam reaktor dan separator 3 fasa (endapan, gas dan cairan). Sementara endapan tetap di dalam reaktor, gas yang diproduksi akan dikumpulkan sebelum limbah cair yang terolah meninggalkan reaktor. (Naturgerechte Technologien, 2001).



Gambar 2.1 Reaktor UASB

Reaktor UASB memiliki beberapa keunggulan dibanding reaktor lain, utamanya jika digunakan untuk negara-negara berkembang, yakni: biaya investasi yang rendah, kebutuhan perawatan yang rendah, performansi yang baik, produksi endapan yang rendah dan dapat menghasilkan energi yang bersih (Naturgerechte Technologien, 2001).

2.3 Faktor yang Mempengaruhi Performansi Reaktor UASB

Adapun beberapa faktor yang mempengaruhi performansi reaktor UASB antara lain (Gómez 2011):

A. Keasaman (pH)

Terdapat tiga prinsip bakteri yang terlibat dalam proses produksi biogas: bakteri bertanggungjawab untuk hidrolisis, pembentukan asam, dan produksi metan. pH yang paling ideal untuk proses produksi asam-asam volatil adalah 5,0 s.d. 6,0, sedangkan untuk produksi metan adalah sebesar 6,7 s.d. 7,4. Jika jangkauan pH reaktor UASB diluar dari 6,0 s.d. 8,0, maka aktivitas produksi metan akan berkurang dan dapat berdampak negative pada performansi reaktor. Bikarbonat yang diproduksi oleh bakteri metonegenesis dapat mengendalikan pengurangan pH yang diakibatkan oleh bakteri penghasil asam.

B. Temperatur

Aktivitas metanogenesis akan dapat terhambat jika reaktor di bawah 30°C. Pada temperatur dari 37 s.d. 55°C, akan terjadi pembuangan endapan dan pembuangan COD yang tidak efisien. Ketika temperatur reaktor UASB diatas 55°C, kualitas efluen tidak sebaik ketika temperatur berada pada kondisi mesofilik.

C. *Organic Loading Rate (OLR)*

OLR adalah massa dari senyawa organik yang dibebankan per hari per luas penampang reaktor. Derajat kelaparan mikroorganisme pada sistem biologis bergantung pada OLR. Pada OLR tinggi, mikroorganisme berkembang dengan cepat, sedangkan pada OLR rendah, mikroorganisme akan kelaparan.

D. *Hydraulic Retention Time (HRT)* dan laju aliran *up-flow*

HRT adalah waktu rata-rata cairan influen tetap berada di dalam reaktor, dan laju aliran *up-flow* adalah laju cairan sepanjang ketinggian reaktor UASB.

Lapisan stagnan disekeliling granul dapat dikurangi dengan meningkatkan laju aliran *up-flow*, hal ini bertujuan untuk mengurangi tahanan aliran massa pada cairan stagnan di sekitar granul guna meningkatkan difusi dari fasa cair ke granul, dan kemudian dapat meningkatkan degradasi substrat serta

menstimulasi pertumbuhan mikroorganisme. Laju aliran up-flow pada reaktor UASB umumnya berkisar antara 0,1 s.d. 1,4 $\text{m}^3 \text{h}^{-1}$ (Korsak 2008).

Pada reaktor UASB, bagian *sludge bed* dan *blanket* memiliki partikel terdispersi di mana limbah cair dapat bergerak dan gelembung gas bergerak naik. Dengan demikian, sekalipun aliran influen rendah, distribusi aliran tidak seragam dikarenakan adanya granul dan agitasi akibat gelembung gas tersebut. Kedua fenomena ini menentukan *Residence Time Distribution* (RTD) atau distribusi waktu tinggal pada reaktor UASB.

Dengan demikian diperlukan laju aliran up-flow dan HRT yang tepat untuk memperoleh tahanan aliran massa yang kecil dan distribusi yang semakin seragam dan dengan mempertimbangkan ketinggian reaktor, kemampuan bakteri mengolah limbah (OLR) serta ketersediaan substrat pada limbah.

E. Substrat

Terdapat berbagai jenis limbah cair yang dapat diolah pada reaktor UASB. Namun limbah harus mengandung nutrient dan material organik terlarut. Dengan dasar ini, limbah dari industri makanan merupakan masukan yang paling efektif untuk reaktor UASB. Pada kasus tertentu, air selokan tidak mengandung nutrien yang cukup dan perlu ditambahkan nutrien untuk menciptakan kondisi yang tepat agar dapat diolah di reaktor UASB.

2.4 Kinetika Reaksi

Kinetika mendiskripsikan laju reaksi di mana populasi mikroorganisme mengubah substrat menjadi biogas menggunakan material organik yang terdapat pada limbah cair. Kinetika mikroorganisme secara umum dapat dibagi menjadi empat tahap (Bitton, 2005):

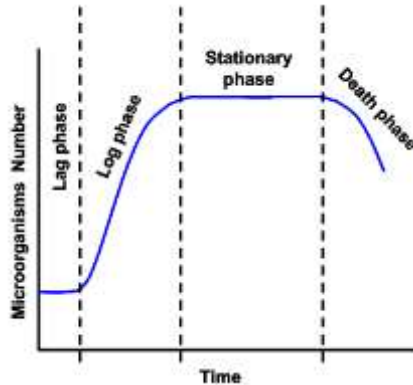
- a. Fasa lag, atau tahap aklimatisasi, tahap ini merupakan tahap adaptasi di mana mikroorganisme menyesuaikan diri dengan substrat baru, hal ini terjadi ketika mikroorganisme terbiasa untuk mendegradasi suatu material organik yang tersedia pada substrat yang berbeda dari sebelumnya. Durasi dari fasa lag ini bergantung pada beberapa faktor, seperti usia sel dan kultur medium. Jika mikroorganisme dikirim ke medium yang serupa, maka tidak terdapat fasa lag.
- b. Fasa eksponensial, dikenali juga sebagai fasa logaritmik. Pada periode ini, populasi berkembang secara eksponensial. Pada umumnya mikroorganisme terpecah menjadi dua, menghasilkan dua mikroorganisme (organisme anak). Kedua mikroorganisme ini kemudian menghasilkan empat mikroorganisme, dan seterusnya, sampai pada fasa keadaan tunak. Adapun persamaan laju pertumbuhan mikroorganisme secara eksponensial dirumuskan sebagai berikut (Monod 1949):

$$R = \frac{\log x_2 - \log x_1}{t_2 - t_1} \quad (8)$$

Di mana x merupakan massa bakteri, indeks 1 dan 2 menyatakan keadaan awal dan akhir dari fasa logritmik dan t adalah waktu.

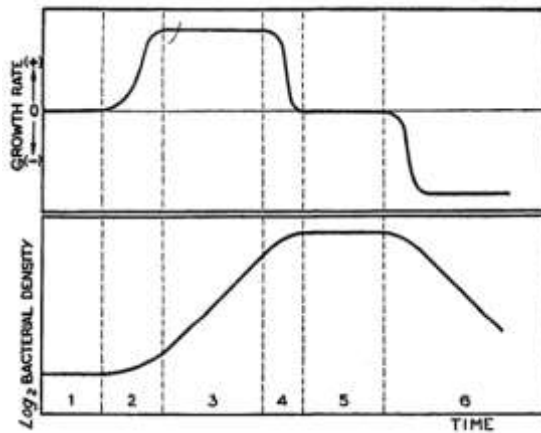
- c. Fasa keadaan tunak. Ini merupakan fasa stasioner di mana mikroorganisme berhenti berkembang, kemudian laju pertumbuhan populasi setara dengan laju kematian mikroorganisme.
- d. Fasa kematian. Ini merupakan fasa di mana laju kematian lebih tinggi dibandingkan dengan laju pertumbuhan, sehingga populasi mikroorganisme aktif menghilang. Hal ini dapat terjadi karena pembangkitan senyawa racun yang memicu kematian mikroorganisme, kurangnya nutrisi (mikroorganisme

menjadi predator), dan kurangnya akseptor elektron (untuk respirasi) atau lisis.



Gambar 2.2 Fasa Pertumbuhan Mikroorganisme menurut Bitton (2005)

Kinetika reaksi yang lebih detail dipaparkan oleh Jaques Monod (1949):



Gambar 2.3 Fasa Pertumbuhan Mikroorganisme menurut Monod (1949)

Pada kinetika yang dijabarkan Monod, terdapat enam tahap fasa pertumbuhan mikroorganisme:

1. Fasa lag (laju pertumbuhan sama dengan nol)
2. Fasa akselerasi (laju pertumbuhan meningkat)
3. Fasa eksponensial (laju pertumbuhan konstan)
4. Fasa penghambatan (laju pertumbuhan berkurang)
5. Fasa stasioner (laju pertumbuhan sama dengan nol)
6. Fasa penurunan (laju pertumbuhan negatif)

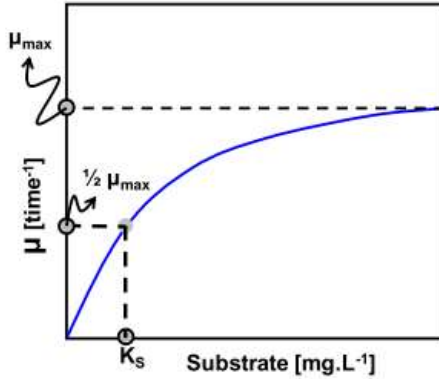
2.5 Model Monod

Model yang paling sering digunakan untuk memodelkan kinetika mikroorganisme adalah model Monod, dikembangkan oleh Jacques Monod pada 1942. Model ini mendiskripsikan pertumbuhan mikroorganisme terhadap waktu, dengan memperhitungkan nutrien atau konsentrasi substrat. Model ini merupakan persamaan empiris yang menyatakan tidak ada laju pertumbuhan mikroorganisme ketika tidak ada substrat dan mencapai maksimum ketika terdapat ketersediaan substrat atau nutrien (Lorby et al., 2012). Beberapa peneliti melaporkan bahwa model Monod merupakan model yang paling dapat mendiskripsikan pengurangan substrat pada suatu kinetika reaksi mikrobiologi (Simkins & Alexander 1985).

Persamaan Monod untuk laju konsentrasi bakteri adalah sebagai berikut:

$$\frac{dX}{dt} = \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} X \quad (9)$$

Di mana X merupakan konsentrasi mikroorganisme, μ_{\max} merupakan laju pertumbuhan spesifik maksimum, S merupakan konsentrasi substrat, K_s merupakan konsentrasi substrat ketika laju pertumbuhan spesifik mencapai setengah dari laju pertumbuhan spesifik maksimum dan t adalah waktu. Berikut ini merupakan makna K_s dan μ_{\max} .



Gambar 2.4 Kurva Monod, definisi Konstanta Monod

Laju pertumbuhan spesifik suatu bakteri juga didefinisikan sebagai berikut:

$$\mu = \frac{\ln x - \ln x_o}{t} \quad (10)$$

Di mana x_o merupakan massa mikroorganisme mula-mula dan x merupakan massa mikroorganisme setelah melalui interval waktu t . Dengan demikian, maka nilai laju pertumbuhan spesifik maksimum dapat diketahui secara eksak dengan mengetahui massa maksimum bakteri dan interval waktu yang dibutuhkan.

Adapun dengan mempertimbangkan konstanta kematian dari bakteri (K_d), maka persamaan Monod dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dX}{dt} = \left(\mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} - K_d \right) X \quad (11)$$

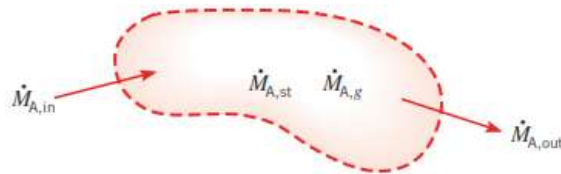
Faktor konstanta kematian bakteri merupakan konstanta yang pertimbangan kematian bakteri yang akan mempengaruhi pertumbuhan mikroorganisme secara keseluruhan. Faktor ini dipengaruhi oleh kondisi operasi dari suatu sistem di mana reaksi mikroorganisme terjadi.

2.6 Persamaan Perpindahan Massa

Persamaan difusi massa untuk senyawa kimia dengan mempertimbangkan laju massa yang masuk, laju massa yang tersimpan, laju massa yang dibangkitkan dan laju massa keluaran, adalah sebagai berikut:

$$\dot{M}_{A,in} + \dot{M}_{A,g} - \dot{M}_{A,out} = \frac{dM_{A,in}}{dt} \equiv \dot{M}_{A,st} \quad (12)$$

di mana $\dot{M}_{A,in}$ merupakan laju masa masuk ke dalam sistem, $\dot{M}_{A,g}$ merupakan laju massa yang dibangkitkan oleh sistem, $\dot{M}_{A,out}$ adalah laju massa yang keluar dari sistem, dan $\dot{M}_{A,st}$ adalah laju massa yang tersimpan di dalam sistem. Ilustrasi dari persamaan di atas ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 2. 2 Konservasi Massa untuk Volume Kontrol
(Incropera & Dewitt 2011)

Sedangkan persamaan konservasi massa untuk senyawa kimia yang mengalami perpindahan, yang mempertimbangkan perpindahan akibat dispersi, adveksi dan reaksi pada satu dimensi dideskripsikan dengan persamaan berikut (Fernandes & Karney 2001):

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - v \frac{\partial C}{\partial x} + \frac{\partial q}{\partial x} \quad (13)$$

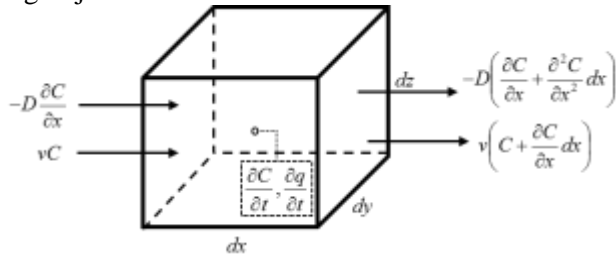
Di mana C merupakan konsentrasi senyawa dalam air (kg/m^3), t adalah waktu (s), v adalah laju aliran air pada sumbu x (m/s), x adalah jarak tempuh perpindahan massa (m), q adalah kosentrasi pada fasa solid atau dalam hal ini mewakili reaksi. D merupakan

konstanta dispersi hidrodinamik yang dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$D = D_e + \alpha_L v \quad (14)$$

Di mana D_e merupakan koefisien difusi efektif (m^2/s), dan α_L dispersivitas (m).

Bagian $D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$ merawakili perpindahan secara dispersi, $-v \frac{\partial C}{\partial x}$ mewakili perpindahan secara adveksi, dan $\frac{\partial q}{\partial x}$ mewakili reaksi yang terjadi.



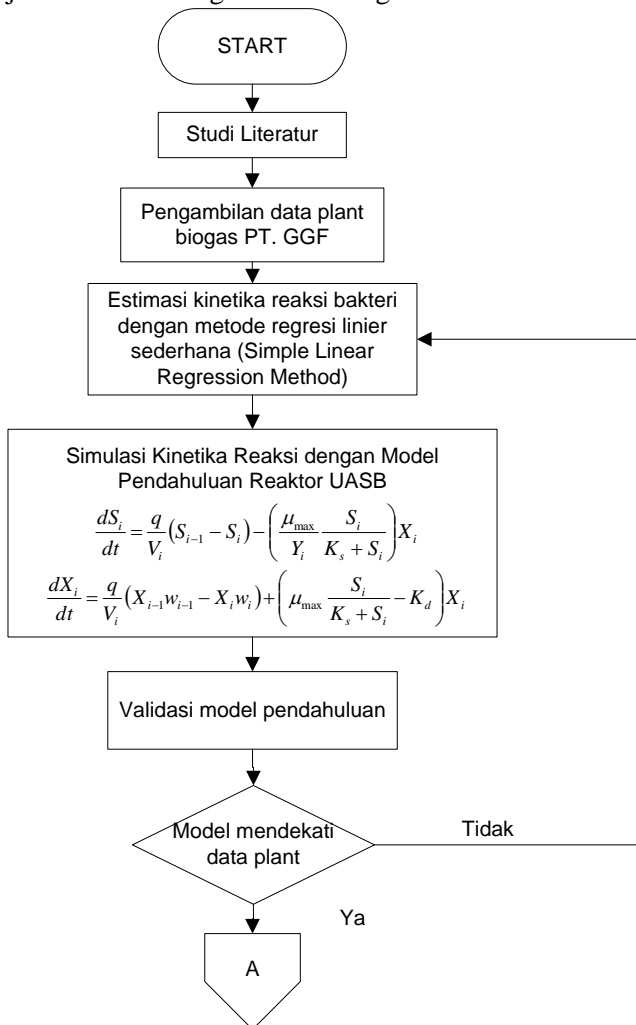
Gambar 2. 3 Perpindahan Massa akibat Dispersi, Adveksi, dan Reaksi

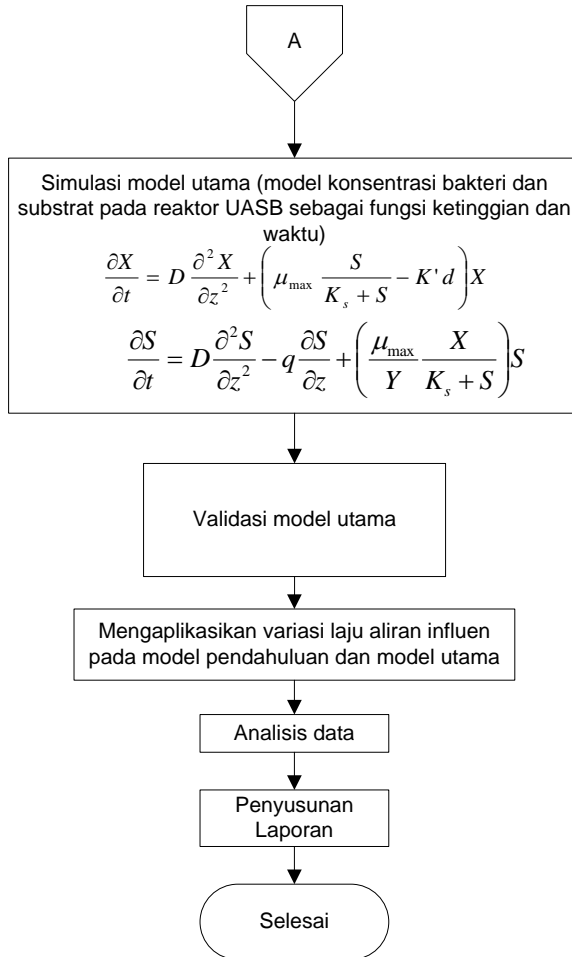
Pada umumnya, v dan D pada suatu perpindahan massa diasumsikan sama untuk seluruh spesies yang terlarut.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB III METODOLOGI

Langkah-langkah dalam pengerjaan tugas akhir ini ditunjukkan dalam diagram alir sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram Alir Tugas Akhir

3.1 Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahap di mana penulis akan melakukan penggalian terhadap literatur-literatur yang menunjang dalam menyelesaikan tugas akhir serta mengumpulkan informasi sehingga cukup untuk memberikan wawasan mengenai reaktor

UASB, kinetika reaksi bakteri, kesetimbangan massa pada reaktor UASB, proses yang terjadi di dalamnya, serta wawasan lain untuk menunjang pembuatan dan analisis tugas akhir ini.

3.2 Pengambilan Data Plant Biogas PT Great Giant Food

Pengambilan data plant biogas PT. Great Giant Food diperlukan untuk melakukan estimasi parameter-parameter kinetika reaksi untuk bakteri metanogen dengan metode regresi linier sederhana atau *Simplified Liniear Regression Method* (SLRM). Adapun data-data yang diperlukan adalah konsentrasi substrat influen (S_0), konsentrasi substrat efluen (S_e), konsentrasi bakteri efluen (X_e), volume biomassa (V_b), dan laju aliran influen (Q). Data-data yang diolah dalam tugas akhir ini merepresentasikan performa reaktor biogas selama dua tahun (Januari 2015 s.d. Desember 2016).

3.3 Estimasi Kinetika Reaksi Bakteri dengan Metode Regresi Linier Sederhana

Melalui model kinetik, informasi yang penting mengenai bakteri dapat diperoleh, seperti laju pertumbuhan spesifik bakteri, koefisien saturasi, koefisien kematian bakteri, dan koefisien hasil. Untuk memperoleh parameter-parameter model kinetik pada reaktor UASB, metode regresi linier sederhana dapat diterapkan seperti yang telah diterapkan oleh Matangue, dkk (2011) dan Bhunia & Ghangrekar (2008).

Untuk suatu reaktor UASB tanpa pengembalian biomassa, laju perubahan biomassa dan substrat dalam sistem dapat diekspresikan dalam persamaan berikut:

$$\frac{dX}{dt} = \frac{Q}{V_b} (X_0 - X_e) + (\mu X - K_d X) \quad (15)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{Q}{V_b} (S_0 - S_e) - \frac{\mu X}{Y} \quad (16)$$

Pada *steady state* perubahan konsentrasi sama dengan nol, dan konsentrasi biomassa pada influen diasumsikan sama dengan nol, persamaan dapat dituliskan kembali menjadi:

$$0 = \frac{Q}{V_b}(-X_e) + (\mu X - K_d X) \quad (17)$$

$$0 = \frac{Q}{V_b}(S_0 - S_e) - \frac{\mu X}{Y} \quad (18)$$

Persamaan lain yang dilibatkan dalam menyederhanakan persamaan kekekalan massa tersebut adalah persamaan waktu tinggal sel (*cell retention time*), θ_c yang dinyatakan sebagai berikut:

$$\theta_c = \frac{V_b X}{Q X_e} \quad (19)$$

Hubungan antara laju pertumbuhan spesifik biomassa dan laju pertumbuhan spesifik maksimum dinyatakan dalam persamaan berikut:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S_e}{K_s + S_e} \quad (20)$$

Dengan menjumlahkan persamaan (10) dan (11) dan substitusi dengan persamaan (12), diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$X = \frac{Q Y \theta_c (S_0 - S_e)}{V_b + K_d \theta_c V_b} \quad (21)$$

Dengan mensubstitusi nilai μ pada persamaan (10) dengan persamaan (12) dan (13), maka diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$S_e = \frac{K_s (1 + K_d \theta_c)}{\theta_c (\mu_{\max} - K_d) - 1} \quad (22)$$

Guna mendapatkan persamaan linier untuk mendapatkan parameter Monod, persamaan (14) disederhanakan menjadi bentuk berikut:

$$\frac{Q(S_0 - S_e)}{V_b X} = \frac{1}{Y} \cdot \frac{1}{\theta_c} + \frac{Y}{K_d} \quad (23)$$

Persamaan (23) dapat disederhanakan sebagai berikut:

$$y_d = \beta_1 \cdot x_d + \beta_0 \quad (24)$$

di mana:

$$y_d = \frac{Q(S_0 - S_e)}{V_b X}$$

$$\beta_1 = \frac{1}{Y}$$

$$x_d = \frac{1}{\theta_c}$$

$$\beta_0 = \frac{Y}{K_d}$$

Sedangkan untuk mendapatkan K_s dan μ_{\max} diperoleh dengan menyederhanakan persamaan (22) dan substitusi dengan nilai $\frac{1 + K_d \theta_c}{\theta_c}$ dari persamaan (23). Dengan demikian persamaan dapat

dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{V_b X}{Q(S_0 - S_e)} \frac{1}{Y} = \frac{K_s}{\mu_{\max}} \cdot \frac{1}{S_e} + \frac{1}{\mu_{\max}} \quad (25)$$

Persamaan (24) dapat disederhanakan pula dalam bentuk berikut:

$$y_s = \beta_4 \cdot x_s + \beta_3 \quad (26)$$

di mana:

$$y_s = \frac{V_b X}{Q(S_0 - S_e)}$$

$$\beta_4 = \frac{K_s Y}{\mu_{\max}}$$

$$x_s = \frac{1}{S_e}$$

$$\beta_3 = \frac{1}{\mu_{\max}}$$

Kemudian persamaan (25) digunakan untuk menentukan μ_{\max} dengan estimasi nilai K_s . Pada data yang diperoleh dari reaktor UASB, diperoleh bahwa $\mu_{\max}(t)$ berubah menurut fungsi waktu yang kemudian dapat didekati dengan persamaan logaritmik.

Untuk memperoleh nilai rata-rata $\mu_{\max}(t)$, digunakan persamaan sebagai berikut:

$$\bar{\mu}_{\max} = \frac{1}{T} \int_0^T \mu_{\max}(t) dt \quad (27)$$

Setelah nilai parameter-parameter tersebut diketahui, diperlukan analisis secara statistik dengan variansi dan perbandingan standar deviasi dengan kondisi aktual.

3.4 Simulasi Kinetika Reaksi dengan Model Pendahuluan Reaktor UASB

Penurunan model pendahuluan dilakukan untuk memodelkan reaktor UASB sebagai beberapa buah CSTR bertingkat yang di dalamnya terjadi reaksi. Adapun model pendahuluan substrat (28) dan bakteri (29) dideskripsikan sebagai persamaan diferensial biasa (*Ordinary Differential Equation*) yang terhubung (*coupled*) sebagai berikut:

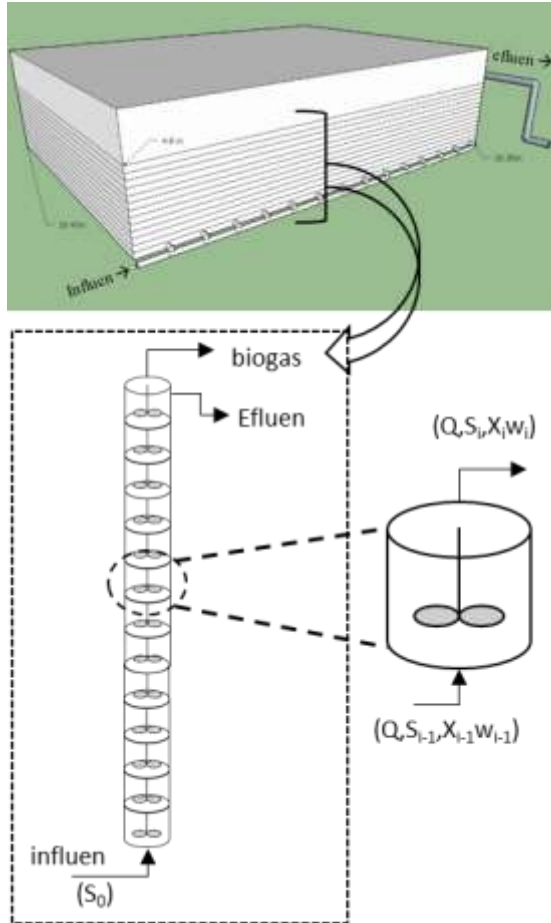
$$\frac{dS_i}{dt} = \frac{q}{V_i} (S_{i-1} - S_i) - \left(\frac{\mu_{\max}}{Y_i} \frac{S_i}{K_s + S_i} \right) X_i \quad (28)$$

$$\frac{dX_i}{dt} = \frac{q}{V_i} (X_{i-1} w_{i-1} - X_i w_i) + \left(\mu_{\max} \frac{S_i}{K_s + S_i} - K_d \right) X_i \quad (29)$$

Di mana:

- S_i = Konsentrasi substrat setelah melewati reaktor i (mg/L)
 S_{i-1} = Konsentrasi substrat sebelum masuk ke reaktor i (mg/L)
 X_i = Konsentrasi bakteri/biomassa setelah melewati reaktor I (mg/L)
 X_{i-1} = Konsentrasi biomassa sebelum masuk ke reaktor i (mg/L)
 q = Laju aliran naik (L/d)
 V = Volume reaktor (m³)
 w_i = Konstanta *washout* setelah melewati reaktor i
 w_{i-1} = Konstanta *washout* sebelum masuk ke reaktor i
 μ_{\max} = Laju pertumbuhan spesifik maksimum bakteri (d⁻¹)
 K_S = Konstanta Monod (mg/L)
 Y_i = Konstanta hasil (kg VSS/kg COD)
 K_d = Konstanta kematian bakteri (d⁻¹)

Konstanta hasil pada model ini didefinisikan sebagai perbandingan laju massa biomassa yang diproduksi dengan laju massa substrat yang terdegradasi. Adapun model pendahuluan ini membagi reaktor dalam sejumlah reaktor tertentu. Kemudian dapat diketahui keluaran konsentrasi substrat dan biomassa dari reaktor tersebut sebagai fungsi terhadap waktu. Susunan reaktor sebagai model dari reaktor UASB aktual digambarkan pada **Gambar 3.2**. Susunan reaktor ini menentukan susunan blok fungsi pada Simulink, konsentrasi substrat dan biomassa masukan dari suatu CSTR merupakan keluaran dari CSTR sebelumnya.



Gambar 3. 2 Reaktor UASB Dimodelkan sebagai CSTR bertingkat

Pembagian reaktor UASB menjadi sejumlah reaktor ditentukan melalui persamaan yang melibatkan *Peclet Number* sebagai parameter tak berdimensi dari reaktor UASB sebagai berikut (Environ 2013):

$$N = \frac{Pe}{2} + 1 \quad (30)$$

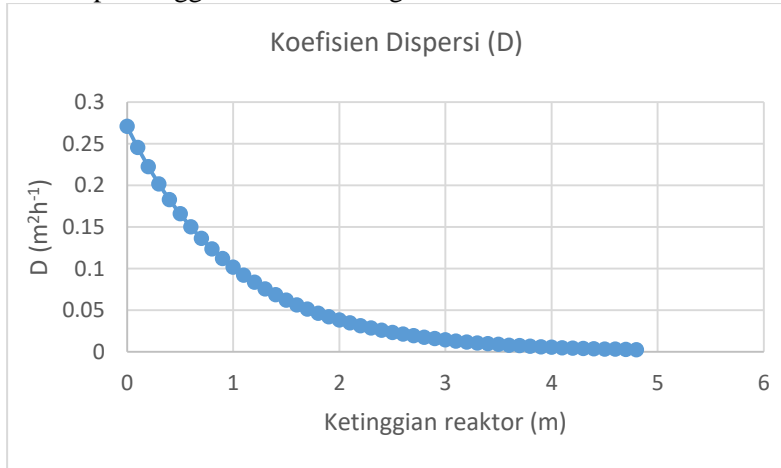
di mana, N merupakan jumlah CSTR dan Pe adalah konstanta tak berdimensi, Peclet Number. Peclet Number dapat diperoleh dengan persamaan berikut:

$$Pe = \frac{v_{up} H}{D} \quad (31)$$

di mana, v_{up} merupakan kecepatan up-flow dari limbah cair di dalam reaktor, H merupakan ketinggian reaktor dan D merupakan koefisien dispersi. Koefisien dispersi dalam UASB reaktor dapat diperoleh dengan persamaan yang dikenalkan oleh Peña et al. (2006):

$$D = 1.03v_{up}^{1.11} 0.009^{\frac{z}{H}} \quad (32)$$

Persamaan (32) menghasilkan variasi nilai koefisien dispersi terhadap ketinggian reaktor sebagai berikut:



Untuk menemukan koefisien dispersi rata-rata yang akan digunakan pada simulasi, dilakukan perhitungan dengan persamaan (32):

$$\bar{D} = \frac{1}{Z} \int_0^Z 1.03v_{up}^{1.11} 0.009^{\frac{z}{H}} dZ \quad (33)$$

Sehingga untuk laju aliran influen $150 \text{ m}^3\text{h}^{-1}$ diperoleh nilai \bar{D} sebesar $0,057 \text{ m}^2\text{h}^{-1}$, Peclet Number sebesar 25,25, dan jumlah reaktor sebanyak 14 reaktor.

Adapun kekurangan pada model (28) dan (29) adalah tidak dapat dilihatnya profil substrat dan biomassa di dalam reaktor sebagai fungsi ketinggian reaktor, hanya dapat mengetahui keluaran dari reaktor per satuan waktu tertentu. Untuk melakukan validasi pada model ini, dilakukan perbandingan konsentrasi substrat efluen yang diperoleh dari hasil simulasi model dengan hasil pengujian laboratorium.

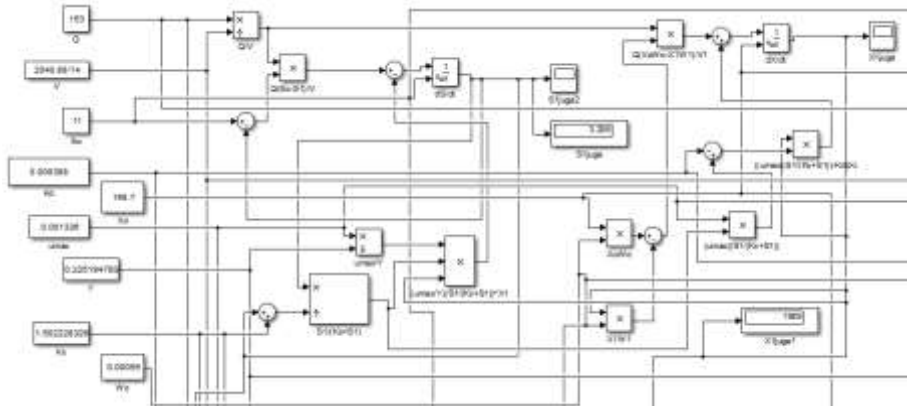
3.5 Validasi Model Pendahuluan

Pada langkah ini, dilakukan pengujian model dengan data konsentrasi influen dan efluen substrat sehingga model pendahuluan dapat dilihat kesesuaiannya dengan data plant. Adapun pada model pendahuluan, reaktor biogas dibagi menjadi 14 reaktor berdasarkan perhitungan pada subbab sebelumnya. Reaktor 1 merepresentasikan partisi reaktor paling bawah, reaktor 2 merepresentasikan partisi reaktor di atasnya dan seterusnya hingga reaktor 14 yang merepresentasikan partisi reaktor paling atas. Untuk menguji model pendahuluan dengan parameter pada tahap sebelumnya, dilakukan simulasi menggunakan Simulink dengan MATLAB R2014b dengan nilai parameter yang digunakan dan *set-up* sebagai berikut:

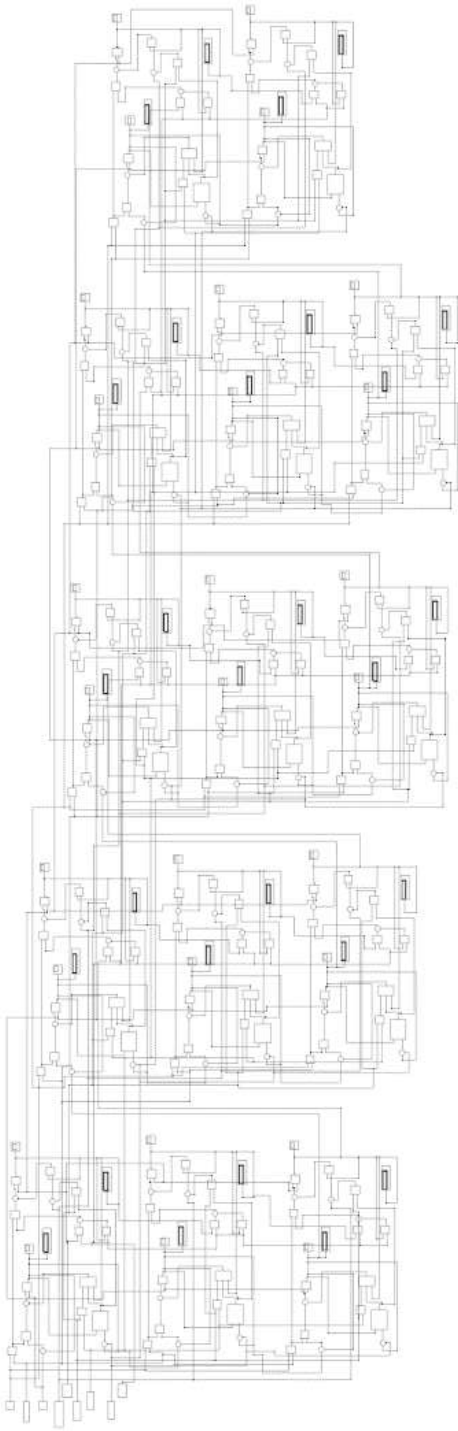
Tabel 3. 1 Parameter Kinetika Reaksi

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Volume Reaktor	V	2040,88	m^3
2	Konsentrasi Substrat influen	S_0	11	kg/m^3
3	Konstanta Hasil	Y_i	0,28047	$\text{kg VSS}/\text{kg COD}$
4	Laju kematian	K_d	0,00070	h^{-1}
5	Laju Pertumbuhan Spesifik Maksimum	μ_{\max}	0,001078	h^{-1}
6	Konstanta Monod	K_s	0,93	kg/m^3

7	Konsentrasi Biomassa mula-mula	X_0	167,68	kg/m ³
8	Konstanta <i>washout</i>	w_i	0,0002	-
9	Laju aliran influen	Q	153	m ³ /h
10	Luas penampang reaktor	A	510,33	m ²



Gambar 3.3 Set-up Simulasi Satu Reaktor dengan Simulink



Gambar 3. 4 Set-up Simulasi 14 Reaktor

3.6 Simulasi Model Utama (Model Konsentrasi Bakteri dan Substrat pada Reaktor UASB sebagai Fungsi Ketinggian dan Waktu)

Setelah simulasi model pendahuluan, dilakukan simulasi parameter untuk model utama yaitu konsentrasi bakteri dan substrat terhadap ketinggian reaktor UASB. Persamaan tersebut diperoleh sebagai berikut (Marinov, Brebbia 2010):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = Dw \frac{\partial^2 X}{\partial z^2} - v_{up} w \frac{\partial X}{\partial z} + \left(\mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} - K_d \right) X \quad (33)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = D \frac{\partial^2 S}{\partial z^2} - v_{up} \frac{\partial S}{\partial z} + \left(\frac{\mu_{\max}}{Y} \frac{X}{K_s + S} \right) S \quad (34)$$

Pada persamaan (33), ruas kanan mewakili faktor akumulasi atau perubahan konsentrasi biomassa sebagai fungsi ketinggian (z) dan waktu (t) terhadap waktu, pada bagian pertama di sebelah

kanan, $Dw \frac{\partial^2 X}{\partial z^2}$, mewakili perpindahan massa secara dispersi.

Pada persamaan biomassa ini, perpindahan massa secara adveksi dipengaruhi oleh fraksi *washout* yang ditunjukkan pada bagian

$qw \frac{\partial X}{\partial z}$. Sedangkan bagian paling kanan pada persamaan (32)

mewakili reaksi yang terjadi dalam reaktor.

Persamaan (34) mendiskripsikan perubahan substrat (COD) dalam reaktor UASB. Pada bagian ruas kiri mewakili akumulasi

substrat di dalam reaktor, pada ruas kanan bagian pertama, $D \frac{\partial^2 S}{\partial z^2}$

, mewakili perpindahan massa secara dispersi, bagian berikutnya,

$q \frac{\partial S}{\partial z}$, mewakili perpindahan substrat secara adveksi, sedangkan

berikutnya mewakili faktor reaksi yang terjadi di dalam reaktor UASB, yang mana mengikuti kinetika reaksi model Monod.

Konsentrasi substrat mula-mula yang akan masuk dalam reaktor adalah S_0 , konsentrasi substrat saat masuk ke dalam reaktor merupakan konsentrasi substrat pada ketinggian 0 m ($z = 0$ m),

dikurangi dengan faktor transportasi massa secara dispersi. Sedangkan pada ketinggian $H=4,8$ m, gradien konsentrasi sama dengan nol. Maka persamaan kondisi awal dan kondisi batas dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\text{Kondisi awal } t = 0; S_{(z,0)} = S_0 \quad (35)$$

$$\text{Kondisi batas } z = 0; qS_{in} = qS\Big|_{z=0^+} - D\frac{\partial S}{\partial z}\Big|_{z=0^+} \quad (36)$$

$$\text{Kondisi batas } z = H; \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad (37)$$

Adapun model tersebut merupakan persamaan diferensial parsial (*Partial Difference Equation*) yang terkopel. Untuk itu dilakukan simulasi dengan software COMSOL Multiphysics 5.2 dengan fasilitas *Transport of Diluted Species*.

3.7 Validasi Model Utama

Setelah hasil model konsentrasi biomassa dan substrat sebagai fungsi ketinggian dan waktu diperoleh, dilakukan simulasi menggunakan COMSOL Multiphysics 5.2 untuk mengetahui kesesuaian model dengan data lapangan. Parameter simulasi yang digunakan sebagai berikut:

Tabel 3.2 Parameter Model Utama

No.	Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
1	Ketinggian Reaktor	H	4,8	m
2	Konsentrasi Substrat influen	S_0	11	kg/m ³
3	Konstanta Hasil	Y	0,28047	kg VSS/kg COD
4	Laju kematian	K_d	0,00070	h ⁻¹
5	Laju Pertumbuhan Spesifik Maksimum	μ_{\max}	0,001078	h ⁻¹
6	Konstanta Monod	K_s	0,93	kg/m ³
7	Konsentrasi Biomassa mula-mula	X_0	167,68	kg/m ³

8	Konstanta <i>washout</i>	W	0,0002	-
9	Laju aliran <i>upflow</i>	q	0,299871	m/h
10	Konstanta Dispersi	$D_{(z)}$	$3.10^{-5} e^{-0.981z}$	m ² /s

3.8 Mengaplikasikan Variasi Laju Aliran Influen pada Model Pendahuluan dan Model Utama

Pada tahap ini dilakukan variasi laju aliran influen yang diterapkan pada model pendahuluan dan model utama, sebagai berikut:

Tabel 3.3 Variasi laju aliran influen pada model pendahuluan

No.	Variasi influen	Q (m ³ /h)	v_{up} (m/h)	D (m ² /h)	Pe	N
1	Variasi 1	50	0.0980	0.016	29.39908	16
2	Variasi 2	75	0.1470	0.026	27.13761	15
3	Variasi 3	100	0.1960	0.035	26.87916	15
4	Variasi 4	125	0.2450	0.045	26.13252	15
5	Variasi 5	150	0.2940	0.056	25.19921	14
6	Variasi 6	175	0.3430	0.066	24.94468	14
7	Variasi 7	200	0.3920	0.077	24.4356	14
8	Variasi 8	225	0.4410	0.087	24.33028	14
9	Variasi 9	250	0.4900	0.0981	23.97479	13

Tabel 3. 4 Variasi laju aliran influen pada model utama

No.	Variasi influen	Q (m ³ /h)	v_{up} (m/h)	$D(z)$ (m ² /s)
1	Variasi 1	50	0.097997	$9.10^{-6} e^{-0.981z}$
2	Variasi 2	75	0.146995	$1.10^{-5} e^{-0.981z}$
3	Variasi 3	100	0.195994	$2.10^{-5} e^{-0.981z}$
4	Variasi 4	125	0.244992	$2.10^{-5} e^{-0.981z}$
5	Variasi 5	150	0.293991	$3.10^{-5} e^{-0.981z}$

6	Variasi 6	175	0.342989	$4.10^{-5} e^{-0.981z}$
7	Variasi 7	200	0.391988	$4.10^{-5} e^{-0.981z}$
8	Variasi 8	225	0.440986	$5.10^{-5} e^{-0.981z}$
9	Variasi 9	250	0.489985	$5.10^{-5} e^{-0.981z}$

3.9 Analisis Data

Analisis data meliputi analisis pengaruh laju aliran influen terhadap kinetika reaksi dan perubahan substrat pada reaktor UASB yang berubah terhadap ketinggian reaktor.

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil model pendahuluan. Adapun analisis dilakukan dengan mempertimbangkan hasil konsentrasi biomassa dan substrat di akhir reaksi pada waktu di mana limbah diperkirakan akan keluar dari reaktor. Waktu ini dapat diperhitungkan dengan mengetahui laju dan dimensi reaktor. Kriteria efluen yang baik antara lain:

1. Memiliki kandungan COD dibawah 2000 mg/L atau 2 kg/m³
2. Memiliki persentase pembuangan COD sebesar 70-90%
3. Memiliki sedikit konsentrasi bakteri yang terbuang ($X_e \rightarrow 0$)

Kemudian dilakukan analisis model utama, pada tahap ini dibandingkan laju aliran mana yang tepat untuk reaktor UASB dengan memperhatikan faktor-faktor seperti degradasi substrat, *Organic Loading Rate* (OLR), *Hydraulic Retention Time* (HRT) dan degradasi konsentrasi biomassa terhadap ketinggian. Adapun besaran-besaran yang dianalisis untuk menilai performansi reaktor biogas pada tugas akhir ini adalah COD removal ketika HRT tercapai, COD removal ketika *steady state* tercapai, waktu menuju *steady state*, dan konsentrasi biomassa pada efluen.

3.10 Penyusunan Laporan

Menyusun laporan mengenai tugas akhir yang dilakukan dari awal sampai akhir yang merupakan langkah terakhir dalam penelitian atau pengerjaan tugas akhir ini.

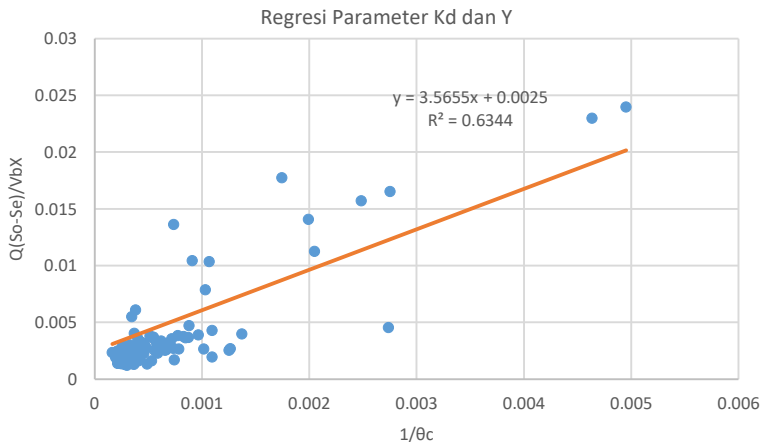
Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pengolahan data, perhitungan dan simulasi yang dilakukan untuk estimasi parameter reaksi, model pendahuluan dan model konsentrasi substrat serta biomassa menurut ketinggian dan waktu, diperoleh hasil-hasil sebagai berikut:

4.1 Estimasi Parameter Monod

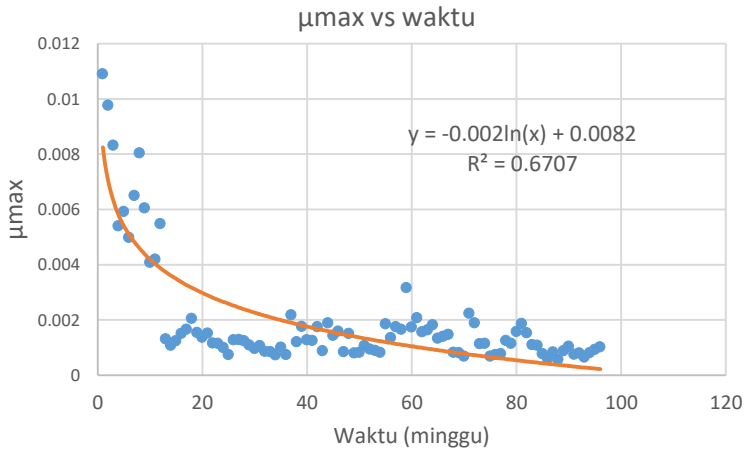
Parameter-parameter model Monod untuk bakteri dalam reaktor UASB ditentukan dengan estimasi parameter menggunakan metode regresi linier dari data-data yang diperoleh dari reaktor UASB PT. GGF. Data tersebut berupa data konsentrasi bakteri mula-mula, konsentrasi substrat mula-mula, konsentrasi substrat pada efluen, volume reaktor, dan laju aliran selama 99 minggu dari tahun 2015 s.d. 2016. Berdasarkan data-data tersebut, diperoleh nilai estimasi sebagai berikut:



Gambar 4.1 Regresi Linier untuk Estimasi K_d dan Y

Persamaan yang diperoleh dari regresi pada **Gambar 4.1** kemudian disesuaikan dengan persamaan (23). Sehingga nilai Y diperoleh sebesar 0,28047 dan nilai K_d sebesar 0,00070 h^{-1} . Estimasi nilai K_s diperoleh dari literatur yakni sebesar 0,93 kg/m^3

(Pavlostathis & Giraldo-Gomez 1991). Kemudian nilai K_s dikembalikan pada persamaan (25) untuk mengetahui perubahan nilai μ_{\max} terhadap waktu sebagai berikut:



Gambar 4.2 Perubahan nilai μ_{\max} terhadap waktu

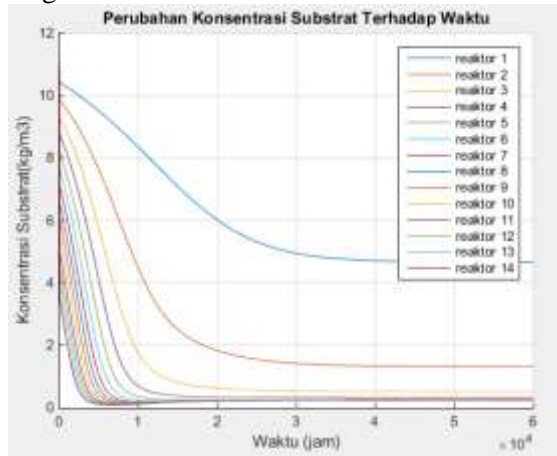
Nilai rata-rata μ_{\max} kemudian diperoleh dengan persamaan (27) sebesar 0,001071.

Pada dasarnya, μ_{\max} merupakan konstanta yang seharusnya tidak berubah terhadap waktu, namun pada penelitian ini, ditemukan hubungan logaritmik antara μ_{\max} terhadap waktu. Hal ini dapat disebabkan oleh perubahan jenis substrat, perubahan karakter bakteri akibat katalis atau makronutrien yang diberikan oleh pengelola reaktor. Selain itu perubahan laju pertumbuhan spesifik maksimum yang bergerak menurun menunjukkan adanya bakteri yang mati namun belum turut diperhitungkan dalam melakukan estimasi.

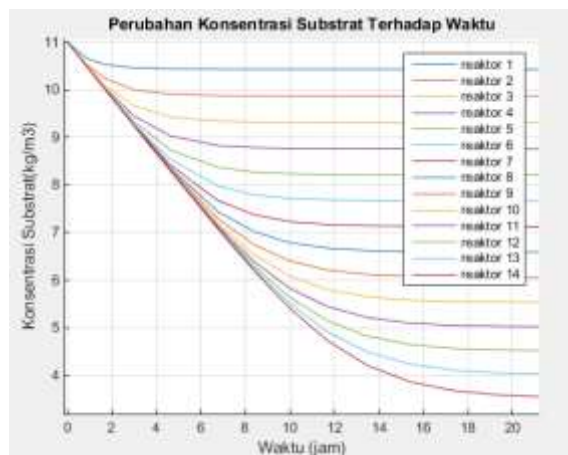
4.2 Validasi Model Pendahuluan

Validasi model pendahuluan dilakukan untuk memastikan bahwa model merepresentasikan kondisi plant biogas PT. GGF.

Penerapan parameter hasil estimasi pada model pendahuluan, diperoleh perubahan substrat terhadap waktu dari reaktor 1 s.d. reaktor 14 sebagai berikut:

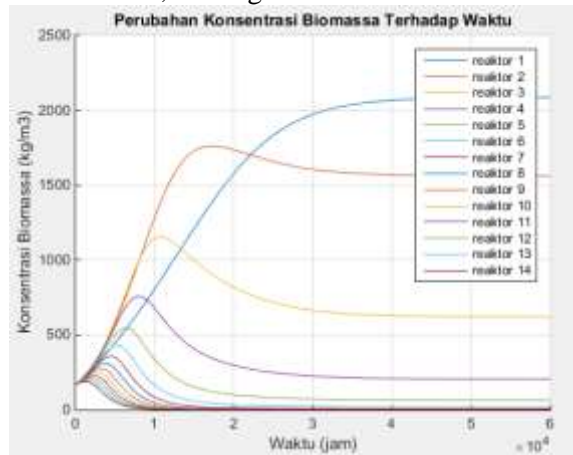


Gambar 4. 3 Perubahan Konsentrasi Substrat terhadap Waktu dengan Parameter dan Kondisi Operasi Reaktor UASB PT. GGF



Gambar 4. 4 Perubahan Konsentrasi Substrat terhadap Waktu dengan Perbesaran pada 20 jam Pertama

Gambar di atas menunjukkan respon model pendahuluan yang merepresentasikan perubahan konsentrasi COD (dalam hal ini merupakan konsentrasi substrat) dari substrat mula-mula sebesar 11 kg/m^3 . Model dijalankan selama 60.000 jam, setara dengan 2500 hari atau 357 minggu. Adapun dengan mengetahui volume reaktor dan laju aliran influen, maka diperoleh waktu tinggal limbah cair dalam reaktor sebesar 16 jam. Saat awal operasi, pada waktu 16 jam, substrat terdegradasi sebesar 65,39% dengan konsentrasi reaktor 14 sebesar $3,807 \text{ kg/m}^3$. Berikutnya dengan mengamati hasil simulasi, kondisi *steady* dicapai setelah reaktor beroperasi selama 50.770 jam atau 2115 hari. Pada kondisi *steady*, reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 57,51% dengan konsentrasi $4,674 \text{ kg/m}^3$ sedangkan reaktor keseluruhan mampu mendegradasi COD sebesar 97,81% dengan konsentrasi substrat efluen sebesar $0,2409 \text{ kg/m}^3$.



Gambar 4. 5 Perubahan Konsentrasi Biomassa terhadap Waktu dengan Kondisi Operasi dan Parameter Reaktor UASB PT. GGF

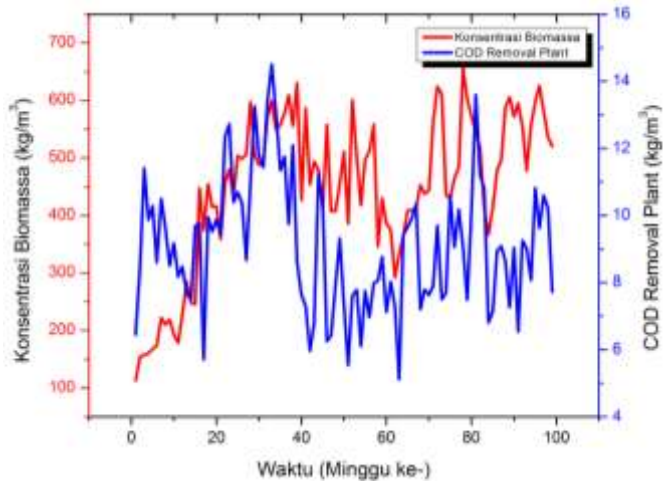
Gambar 4.5 merepresentasikan perubahan konsentrasi biomassa terhadap waktu. Adapun konsentrasi biomassa dalam hal ini mengacu pada konsentrasi mikroorganisme aktif (Gómez 2011). Pada reaktor 1, dapat diamati perilaku organisme yang memiliki laju pertumbuhan yang paling cepat dibandingkan

dengan partisi reaktor lain, hal ini disebabkan oleh banyaknya substrat yang tersedia pada reaktor 1.

Hasil keluaran model ini cukup mendekati kondisi reaktor UASB PT. GGF. Data dari plant dan simulasi dibandingkan dengan membandingkan selisih antara konsentrasi substrat efluen dengan konsentrasi influen. Hal ini dilakukan sebab untuk mendapatkan data simulasi, diperlukan nilai konsentrasi substrat influen yang tetap, pada simulasi ini digunakan konsentrasi sebesar 11 kg/m^3 , sedangkan pada kondisi plant diperoleh nilai konsentrasi substrat influen yang bervariasi terhadap waktu.

Data dari reaktor UASB PT. GGF menunjukkan kisaran konsentrasi COD *removal* sebesar 7,521 s.d. 10,910 kg/m^3 sedangkan hasil simulasi model menunjukkan bahwa kisaran COD *removal* sebesar 5,122 s.d. 14,504 kg/m^3 . Dengan tingkat kepercayaan 95% diperoleh standar deviasi untuk data plant dan simulasi sebesar 1,946 dan 0.500. Sedangkan variansi data plant dan simulasi sebesar 3,787 dan 0,250. Rasio rata-rata data plant dengan hasil simulasi sebesar 1,17. Hal ini menunjukkan kemiripan rata-rata antara simulasi dan data plant.

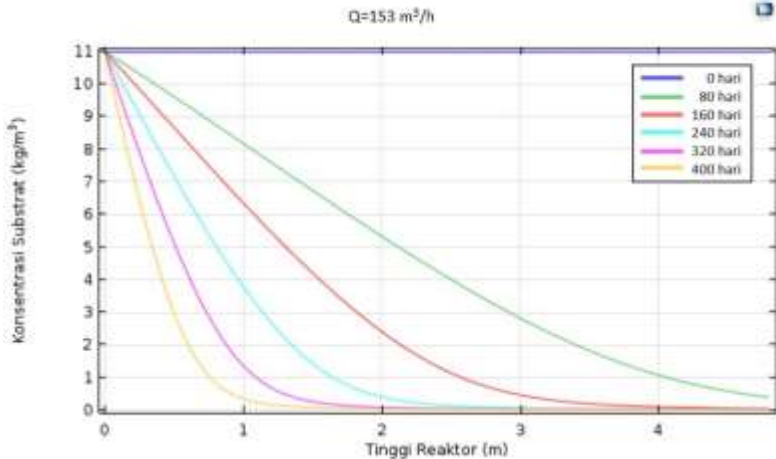
Perbedaan nilai variansi yang tinggi antara hasil simulasi dan data plant dapat disebabkan oleh sifat dari biomassa yang mempengaruhi degradasi substrat. Hubungan pengaruh konsentrasi biomassa dengan degradasi konsentrasi substrat dapat ditunjukkan pada **Gambar 4.6**. Dengan perhitungan statistik, diperoleh nilai korelasi sebesar 0,177. Nilai ini menunjukan terdapat hubungan yang berbanding lurus antara konsentrasi biomassa dengan degradasi substrat, namun hubungan ini cukup lemah. Perubahan jenis substrat seperti variasi konsentrasi limbah nanas dan limbah tapioka yang beragam menurut kepentingan produksi, pengaruh berhentinya operasi reaktor selama beberapa hari, fasa hidup bakteri, kematian bakteri dan kondisi biomassa belum turut dipertimbangkan dalam perhitungan korelasi mengakibatkan rendahnya nilai korelasi ini.



Gambar 4. 6 Perbandingan Perubahan Konsentrasi Biomassa dan Konsentrasi COD Removal terhadap Waktu

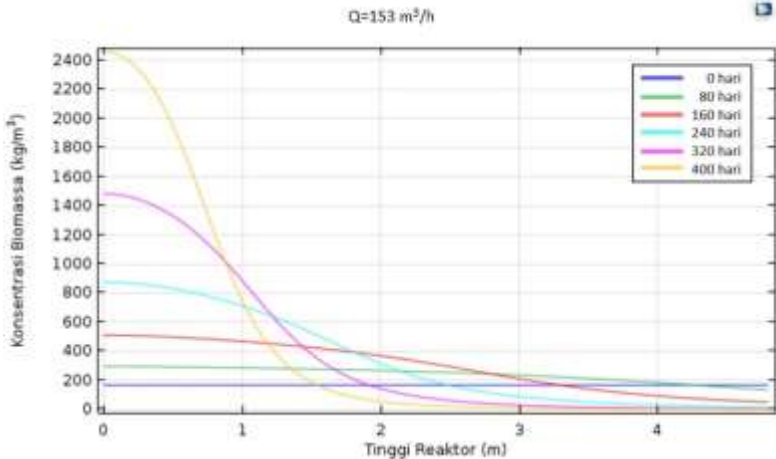
4.3 Validasi Model Utama

Pada validasi model utama, dilakukan simulasi persamaan (26) dan (27) yang menghasilkan respon berupa perubahan konsentrasi substrat dan biomassa sebagai fungsi dari ketinggian reaktor dan waktu operasi yang ditunjukkan pada **Gambar 4.7** dan **Gambar 4.8**. Model dijalankan untuk periode 400 hari.



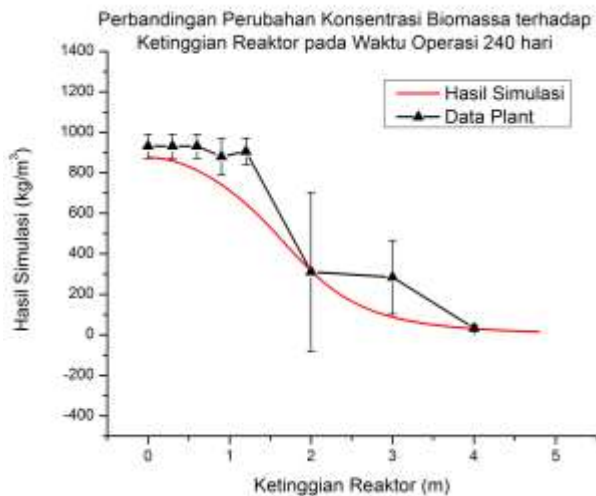
Gambar 4. 7 Respon Profil Substrat pada Waktu Operasi yang Berbeda

Sebagian besar substrat terdegradasi pada dasar reaktor. Gambar di atas menunjukkan pada awal periode 80 hari, terlihat gradien konsentrasi yang tetap hingga ketinggian sekitar 3,5 m, pada waktu operasi berikutnya, gradien konsentrasi terhadap ketinggian reaktor semakin curam, sampai pada periode 400 hari, sebagian besar substrat telah terdegradasi sebelum mencapai ketinggian 1 meter.

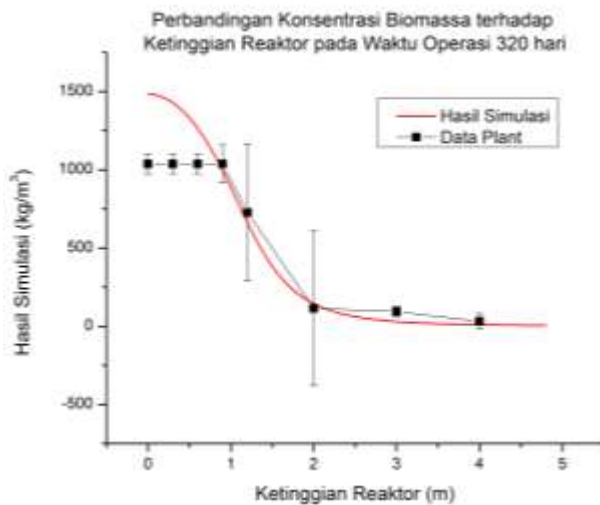


Gambar 4. 8 Respon Profil Biomassa pada Waktu Operasi yang Berbeda

Pada **Gambar 4.8**, dapat diperhatikan bahwa sebagian besar biomassa terdapat pada bagian dasar reaktor. Setelah reaktor beroperasi selama 400 hari, dapat dilihat peningkatan konsentrasi biomassa pada dasar reaktor, dari 167,68 kg/m³ menjadi 2460 kg/m³. Hal ini mendekati kondisi pada reaktor UASB PT. GGF, di mana pada konsentrasi awal operasi reaktor, konsentrasi biomassa mula-mula diperoleh sebesar 167,68 kg/m³. Kemudian setelah reaktor beroperasi selama 100 hari, bagian dasar reaktor setinggi 0,6 m telah seluruhnya terisi *sludge* dengan estimasi konsentrasi berkisar 1039 kg/m³.



Gambar 4. 9 Perbandingan Konsentrasi Biomassa Hasil Simulasi dan Data Plant pada Waktu Operasi 240 hari



Gambar 4. 10 Perbandingan Konsentrasi Biomassa Hasil Simulasi dan Data Plant pada Waktu Operasi 320 hari

Pada waktu operasi 240 hari, dilakukan perbandingan data minggu ke-34 dan ke-35 dengan data hasil simulasi. Data yang digunakan merupakan data dari minggu ke-34 dan ke-35 karena data distribusi konsentrasi menurut ketinggian reaktor diukur setiap minggu dan minggu ke-34 dan minggu ke-35 mendekati waktu operasi 240 hari. Dengan data ini, diperoleh bahwa sebagian besar data simulasi sesuai dengan data plant. Adapun galat diperoleh sebesar 18,89%. Pada waktu operasi 320 hari, dilakukan perbandingan data pada minggu ke-45 dan minggu ke-46. Secara garis besar, perilaku simulasi menyerupai data plant, namun terdapat galat keseluruhan sebesar 34,96%. Adapun perbedaan konsentrasi antara model dan keadaan aktual dapat disebabkan oleh kesulitan pengukuran konsentrasi bakteri secara tepat. Pada pengukuran konsentrasi bakteri pada bagian dasar secara aktual, dilakukan pengukuran fraksi volume dan pengukuran berat jenis sludge rata-rata, dengan demikian diperoleh estimasi konsentrasi biomassa pada bagian dasar reaktor. Pada reaktor UASB PT. GGF, diperoleh rata-rata massa jenis *granule* berkisar 1039 kg/m^3 , sehingga konsentrasi pada bagian dasar reaktor berkisar pada nilai massa jenis tersebut dan tidak dapat diperoleh nilai konsentrasi biomassa secara akurat.

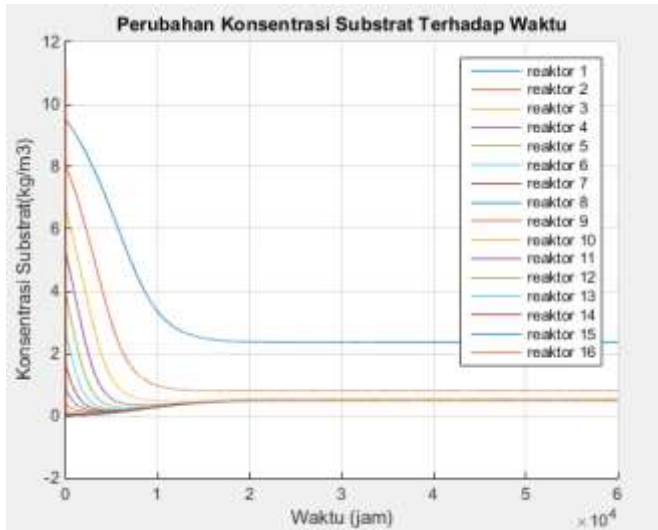
Jika dilakukan perbandingan antara data hasil simulasi model pendahuluan dan model utama, terdapat perbedaan degradasi substrat pada model utama dan model pendahuluan. Hal ini disebabkan oleh perbedaan metode penurunan model yang digunakan dan perbedaan asumsi yang digunakan pada masing-masing model. Pada model pendahuluan, reaktor UASB dianggap sebagai partisi-partisi reaktor yang bertingkat dengan partisi tersebut sebagai CSTR. Sedangkan model utama diturunkan dari persamaan transportasi massa yang mempertimbangkan faktor dispersi, adveksi, konveksi, dan reaksi.

4.4 Simulasi Model Pendahuluan dan Model Utama dengan Variasi Laju Aliran Influen

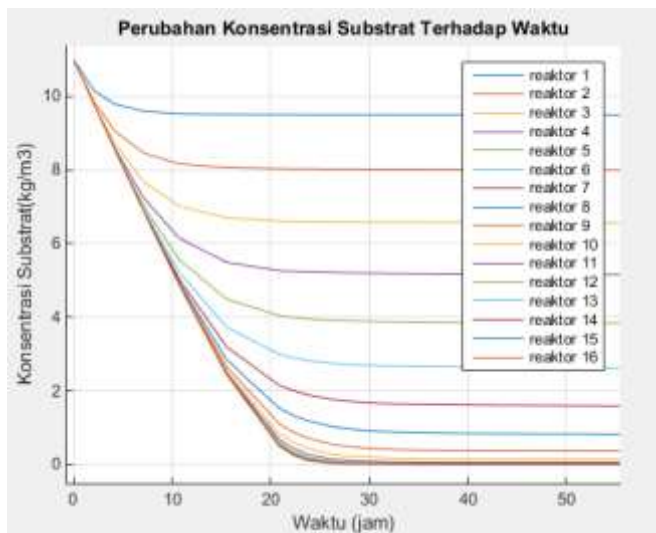
Setelah validasi dilakukan, kemudian dilakukan variasi laju aliran influen untuk model pendahuluan. Adapun dilakukan 9 variasi laju aliran dengan rincian sebagai berikut:

4.4.1 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=50\text{m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $50\text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.12** dan **4.14**. Pada variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 49 jam. Pada awal operasi, saat HRT tercapai, dapat diamati bahwa COD telah sepenuhnya terdegradasi sehingga ketika HRT tercapai, total COD *removal* diperoleh sebesar 100%. Hal ini dikarenakan laju aliran *upflow* yang lambat mengakibatkan bakteri methanogen dapat mendegradasi seluruh substrat yang tersedia. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 22.430 jam atau 934 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 78,53% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $2,362\text{ kg/m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 95,68% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,4758\text{ kg/m}^3$.

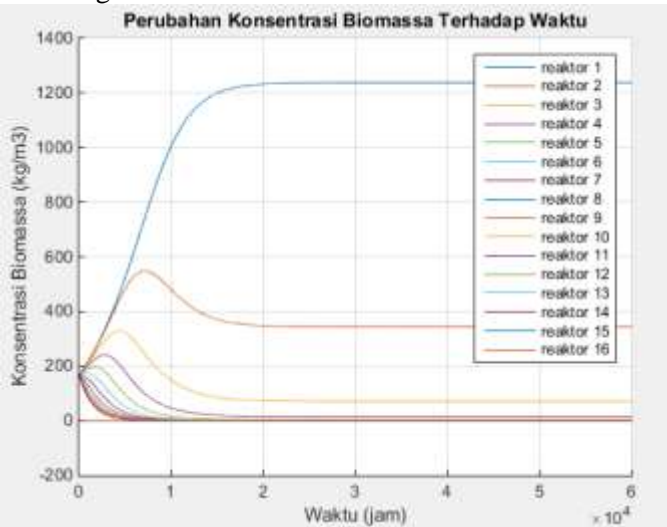


Gambar 4. 11 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $50 \text{ m}^3/\text{h}$



Gambar 4. 12 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $50 \text{ m}^3/\text{h}$ pada 50 jam Pertama

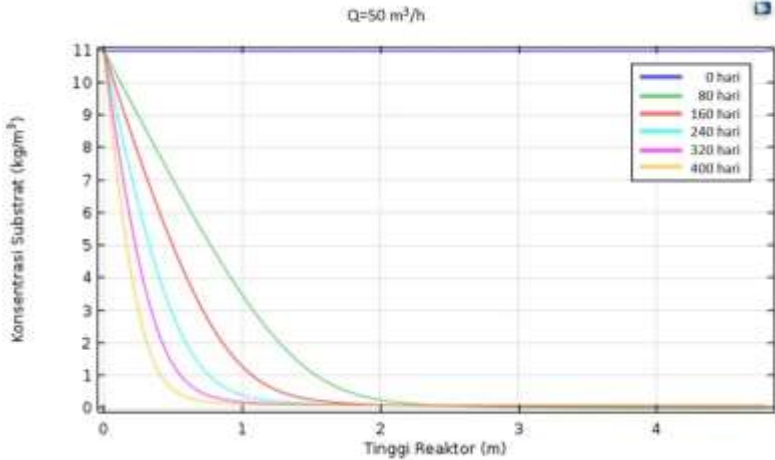
Gambar 4.14 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran $50 \text{ m}^3/\text{h}$. Steady state tercapai di saat yang sama dengan ketika steady state untuk persamaan konsentrasi substrat tercapai. Pada keadaan ini, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 1 yakni sebesar 1.236 kg/m^3 sedangkan pada reaktor 16, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,0000946 \text{ kg/m}^3$.



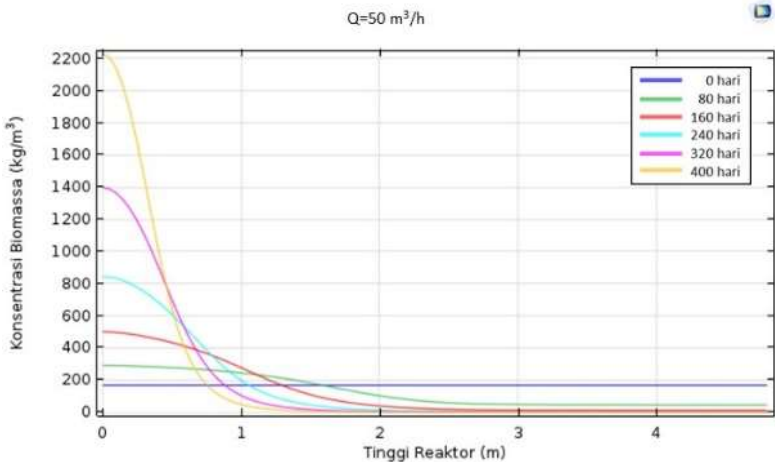
Gambar 4. 13 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $50 \text{ m}^3/\text{h}$

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada **Gambar 4.15** dan **4.16**. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, seluruh substrat telah terdegradasi sebelum mencapai ketinggian reaktor 2 meter. Berdasarkan grafik dapat dilihat semakin lama waktu operasinya, maka substrat akan lebih cepat terdegradasi (sepenuhnya terdegradasi pada ketinggian reaktor yang lebih rendah). Pada profil biomassa, dapat diamati bahwa konsentrasi biomassa tertinggi pada ketinggian lebih kecil sama dengan 1 meter. Rendahnya ketinggian biomassa dalam reaktor disebabkan oleh rendahnya flux massa akibat rendahnya laju aliran pada reaktor UASB dan rendahnya koefisien dispersi sehingga massa yang

dipindahkan secara dispersi menjadi kecil. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari $167,68 \text{ kg/m}^3$ hingga 1175 kg/m^3 . Pada bagian akhir reaktor, dapat diamati konsentrasi biomassa semakin kecil seiring dengan waktu operasi reaktor.



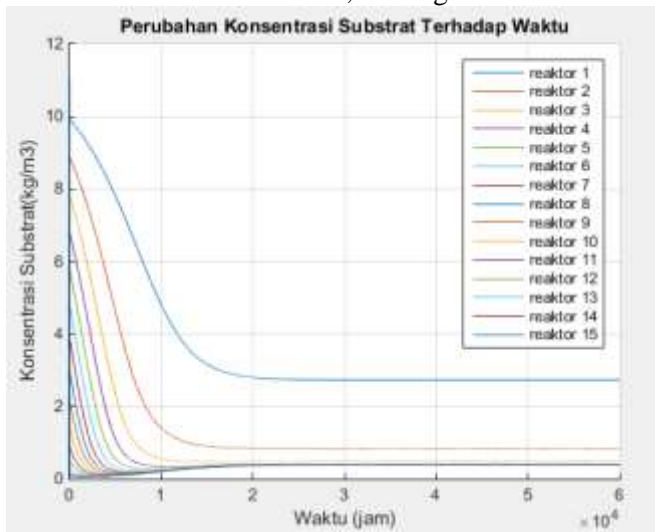
Gambar 4. 14 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran $50 \text{ m}^3/\text{h}$



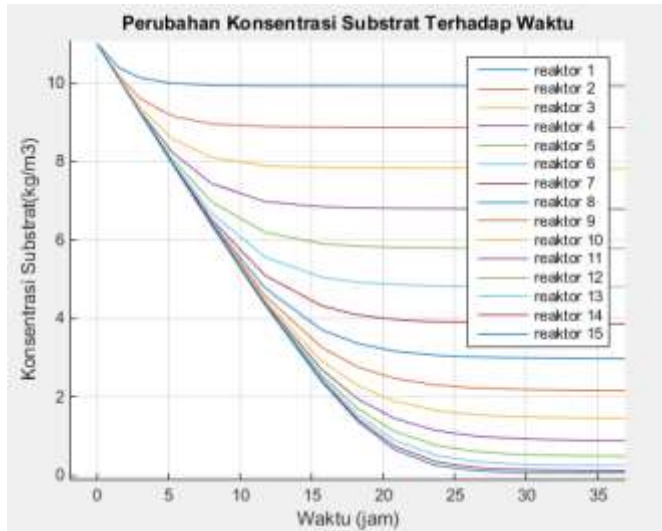
Gambar 4. 15 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $50 \text{ m}^3/\text{h}$

4.4.2 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=75 \text{ m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $75 \text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.17** dan **4.19**. Pada variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 33 jam. Pada awal operasi, saat HRT tercapai, dapat diamati bahwa COD telah sebagian besar terdegradasi sehingga ketika HRT tercapai, total COD *removal* diperoleh sebesar 99,42% dengan COD yang tersisa sebesar $0,0634 \text{ kg/m}^3$. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 25.520 jam atau 1.063 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 75,11% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $2,738 \text{ kg/m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 96,45% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,3906 \text{ kg/m}^3$.

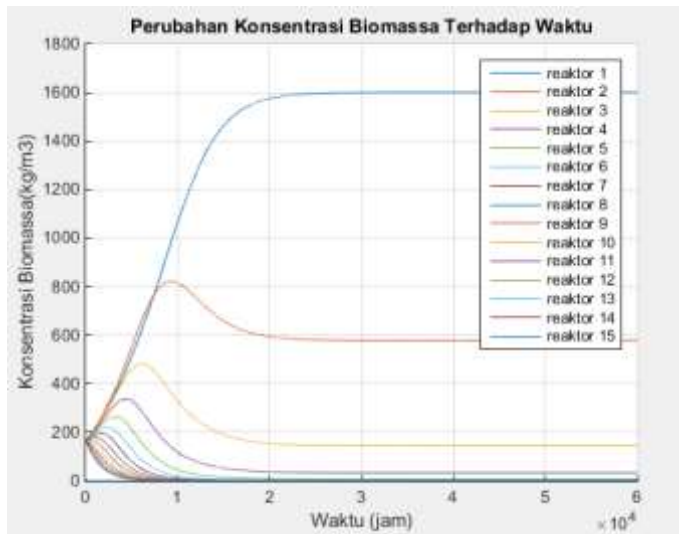


Gambar 4. 16 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $75 \text{ m}^3/\text{h}$



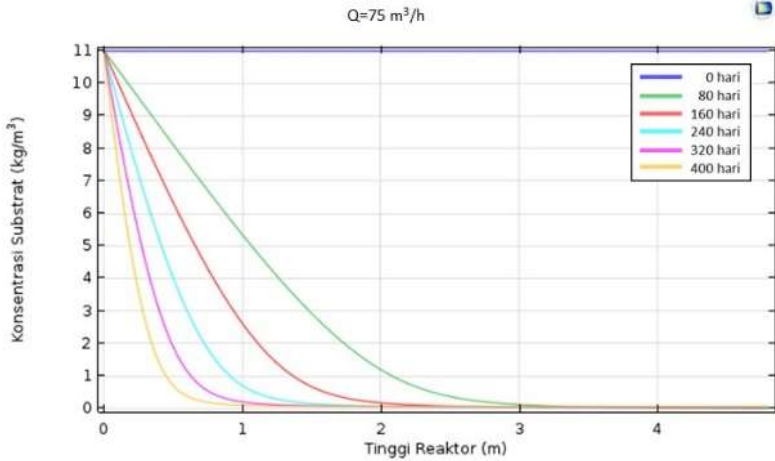
Gambar 4. 17 Respon Profil Konsentrasi Substrat Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $75 \text{ m}^3/\text{h}$ pada 35 jam Pertama

Gambar 4.19 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran $75 \text{ m}^3/\text{h}$. Pada *steady state*, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 1 yakni sebesar 1598 kg/m^3 sedangkan pada reaktor 15, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,0003074 \text{ kg/m}^3$.

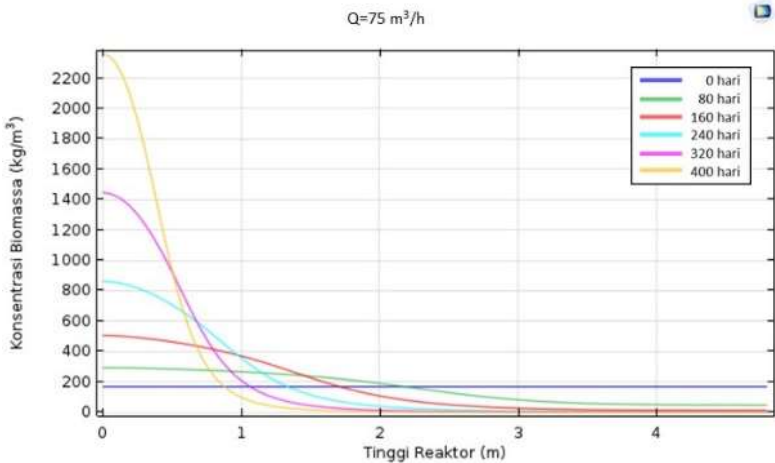


Gambar 4. 18 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 75 m³/h

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada Gambar 4.19 dan 4.20. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, seluruh substrat telah terdegradasi sebelum mencapai ketinggian reaktor 2,5 meter. Berdasarkan grafik dapat dilihat semakin lama waktu operasinya, maka substrat akan lebih cepat terdegradasi. Pada profil biomassa, dapat diamati bahwa konsentrasi biomassa tertinggi pada ketinggian kurang dari 1,5 meter. Dengan demikian dapat dilihat peningkatan ketinggian biomassa karena peningkatan flux massa sehingga lebih besar perpindahan massa secara dispersi dan peningkatan populasi biomassa akibat meningkatnya substrat yang bermanfaat bagi bakteri. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari 167,68 kg/m³ hingga 2361 kg/m³. Pada bagian akhir reaktor, dapat diamati konsentrasi biomassa semakin kecil seiring dengan waktu operasi reaktor.



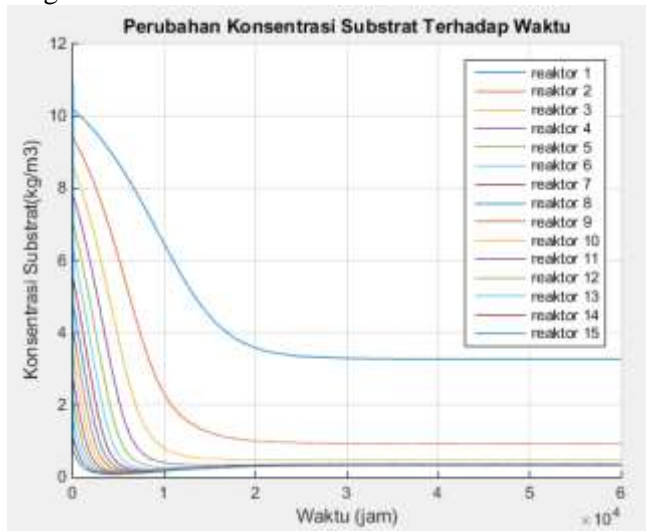
Gambar 4. 19 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran $75 \text{ m}^3/\text{h}$



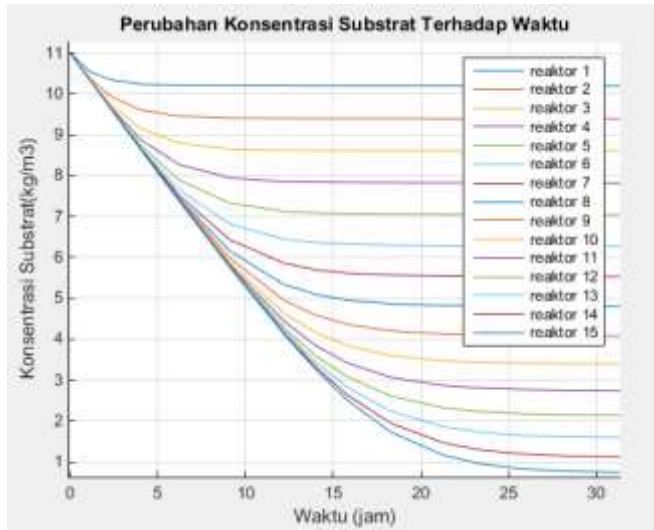
Gambar 4. 20 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $75 \text{ m}^3/\text{h}$

4.4.3 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=100 \text{ m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $100 \text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.22** dan **4.24**. Pada variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 24,5 jam. Pada awal operasi, saat HRT tercapai, dapat diamati bahwa COD telah sebagian besar terdegradasi sehingga ketika HRT tercapai, total COD *removal* diperoleh sebesar 91,85% dengan konsentrasi COD akhir sebesar $0,897 \text{ kg/m}^3$. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai steady state sebesar 30.560 jam atau 1273 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 70,66% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $3,228 \text{ kg/m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 97,08% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,3217 \text{ kg/m}^3$.

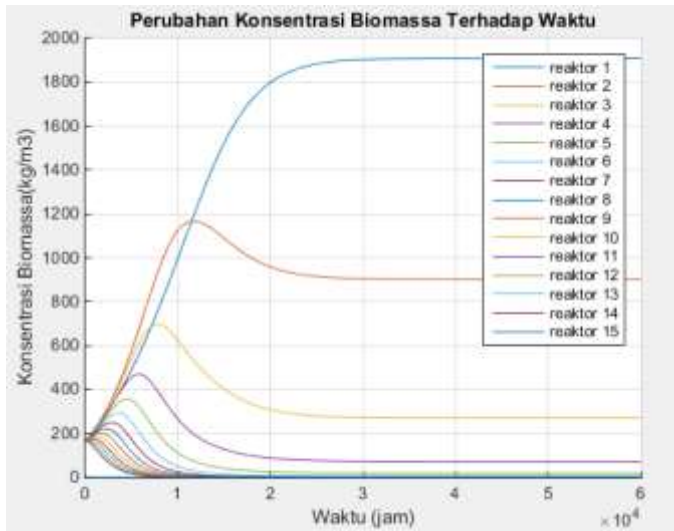


Gambar 4. 21 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $100 \text{ m}^3/\text{h}$



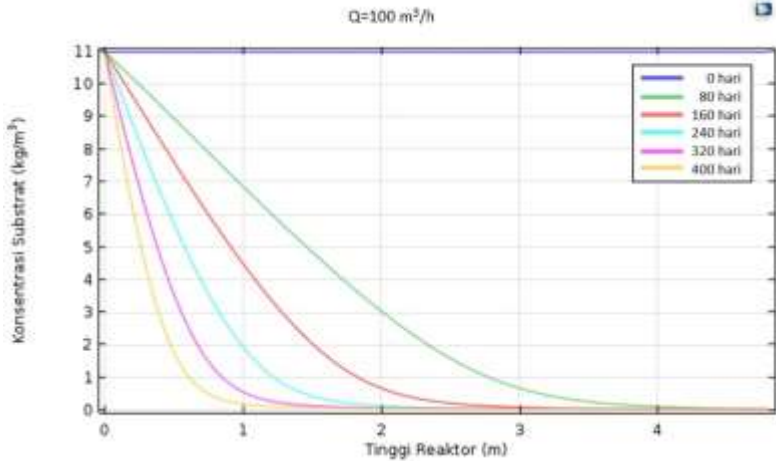
Gambar 4. 22 Respon Profil Konsentrasi Substrat Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $100 \text{ m}^3/\text{h}$ pada 30 jam Pertama

Gambar 4.24 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran. Pada steady state, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 1 yakni sebesar 1904 kg/m^3 sedangkan pada reaktor 15, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,0005757 \text{ kg/m}^3$.

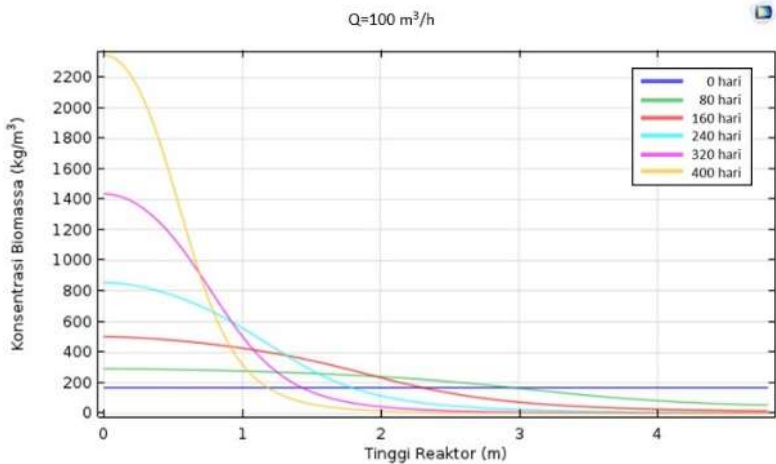


Gambar 4. 23 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $100 \text{ m}^3/\text{h}$

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada **Gambar 4.25** dan **4.26**. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, seluruh substrat telah terdegradasi sebelum mencapai ketinggian reaktor 3,5 meter. Berdasarkan grafik dapat dilihat semakin lama waktu operasinya, maka substrat akan terdegradasi terlebih dahulu pada ketinggian yang lebih rendah. Pada profil biomassa, dapat diamati bahwa konsentrasi biomassa tertinggi pada sebelum ketinggian 2 meter. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari $167,68 \text{ kg/m}^3$ hingga 2350 kg/m^3 .



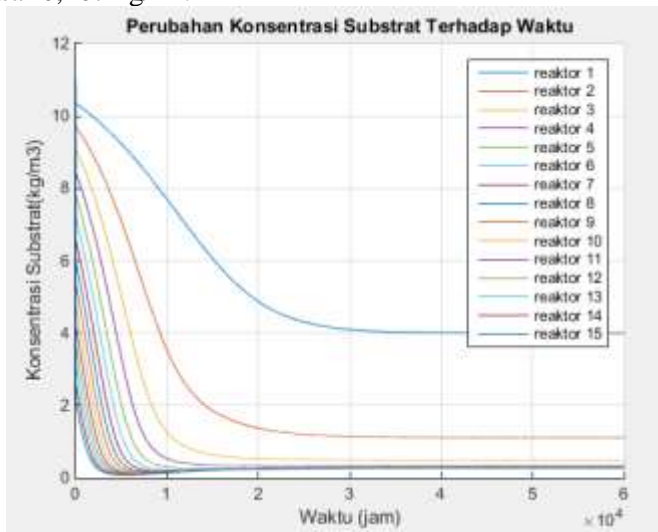
Gambar 4. 24 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran $100 \text{ m}^3/\text{h}$



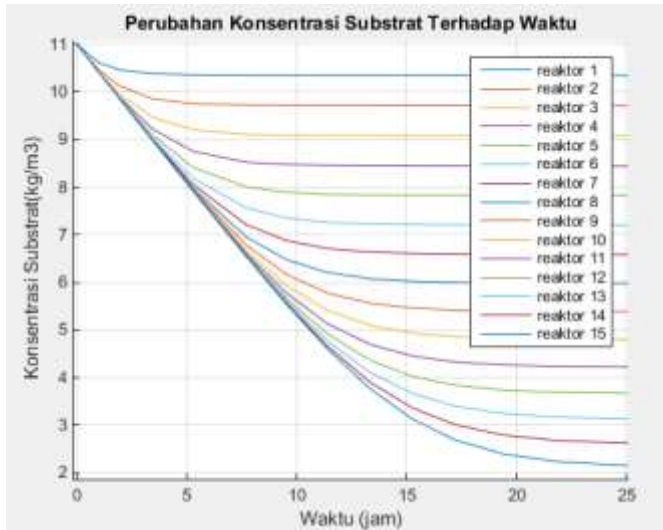
Gambar 4. 25 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $100 \text{ m}^3/\text{h}$

4.4.4 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=125 \text{ m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $125 \text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.27** dan **4.29**. Pada variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 19,6 jam. Pada awal operasi, total COD *removal* diperoleh sebesar 78,31% saat HRT tercapai dengan konsentrasi COD efluen $2,386 \text{ kg/m}^3$. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 38.770 jam atau 1.615,4 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 63,53% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $4,012 \text{ kg/m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 97,57% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,267 \text{ kg/m}^3$.

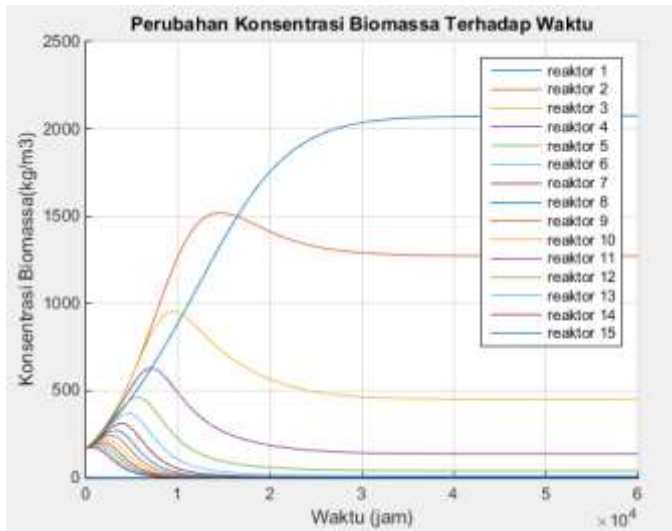


Gambar 4. 26 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $125 \text{ m}^3/\text{h}$



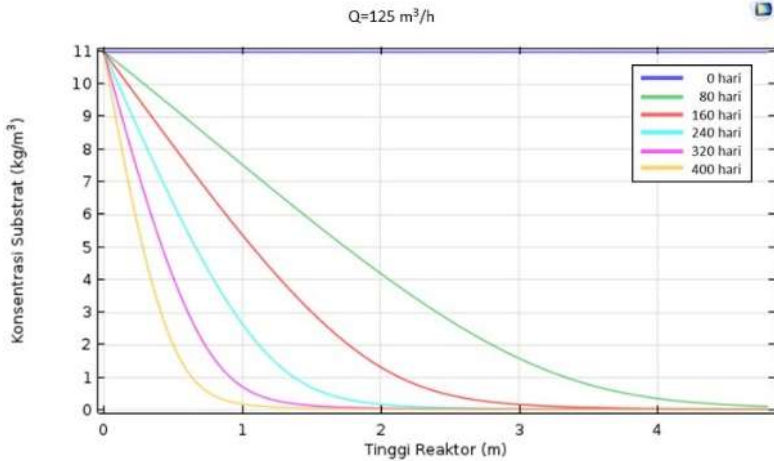
Gambar 4. 27 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $125 \text{ m}^3/\text{h}$ untuk 25 jam Pertama

Gambar 4.29 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran $125 \text{ m}^3/\text{h}$. Pada *steady state*, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 1 yakni sebesar 2.072 kg/m^3 sedangkan pada reaktor 15, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,0006684 \text{ kg/m}^3$.

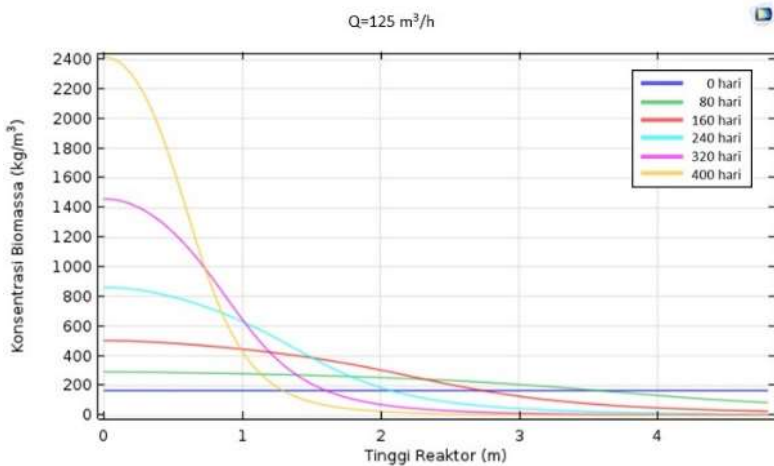


Gambar 4. 28 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $125 \text{ m}^3/\text{h}$

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada **Gambar 4.30** dan **4.31**. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, seluruh substrat telah terdegradasi sebelum mencapai ketinggian reaktor 4,8 meter. Berdasarkan grafik dapat dilihat semakin lama waktu operasinya, maka substrat akan lebih cepat terdegradasi. Pada profil biomassa, dapat diamati bahwa konsentrasi biomassa tertinggi pada ketinggian 2,5 meter. Meningkatnya ketinggian biomassa dalam reaktor disebabkan oleh meningkatnya flux massa akibat meningkatnya laju aliran pada reaktor UASB. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari $167,68 \text{ kg/m}^3$ hingga 2.418 kg/m^3 .



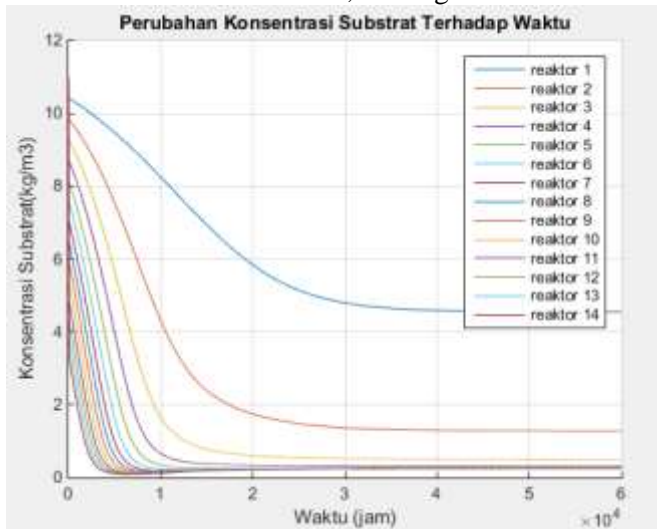
Gambar 4. 29 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $125 \text{ m}^3/\text{h}$



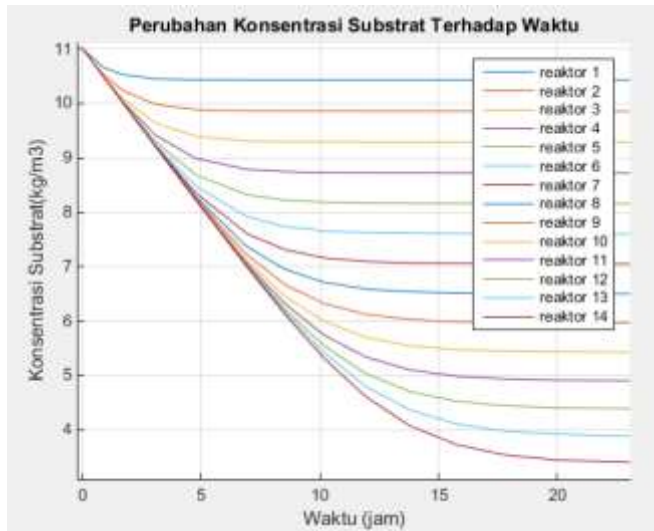
Gambar 4. 30 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $125 \text{ m}^3/\text{h}$

4.4.5 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=150\text{m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $150\text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.32** dan **4.34**. Pada variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 16,3 jam. Pada awal operasi, saat HRT tercapai, total COD *removal* diperoleh sebesar 66,58%. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 48.640 jam atau 2.027 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 58,55% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $4,58\text{ kg/m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 97,74% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,2488\text{ kg/m}^3$.

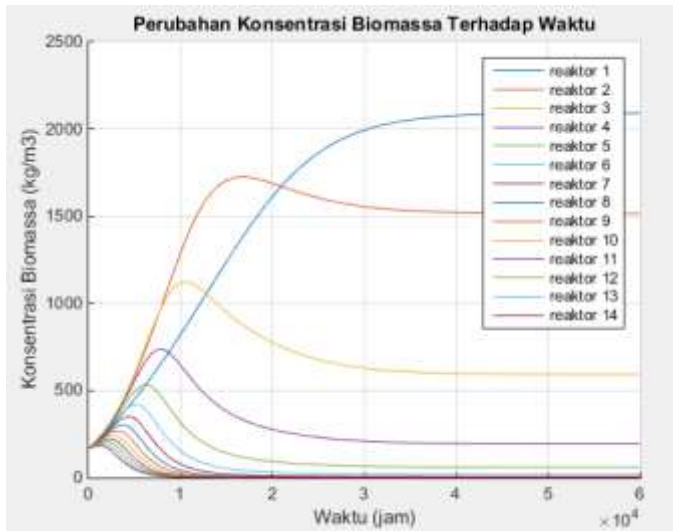


Gambar 4. 31 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $150\text{ m}^3/\text{h}$



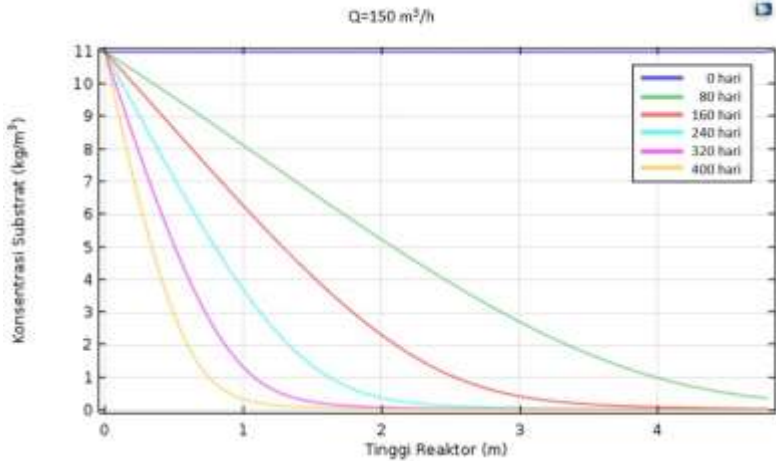
Gambar 4. 32 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $150 \text{ m}^3/\text{h}$ untuk 20 jam Pertama

Gambar 4.34 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran $150 \text{ m}^3/\text{h}$. Pada steady state, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 1 yakni sebesar 2.089 kg/m^3 sedangkan pada reaktor 14, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,001393 \text{ kg/m}^3$.

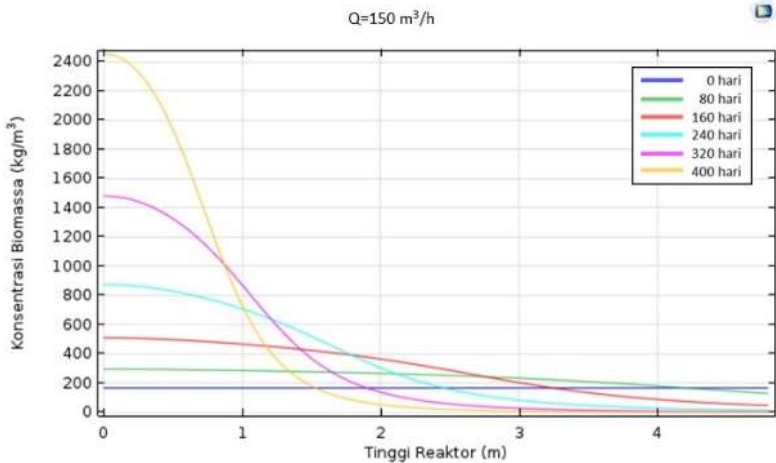


Gambar 4. 33 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $150 \text{ m}^3/\text{h}$

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada **Gambar 4.35** dan **4.36**. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, pada waktu operasi 80 hari, substrat belum seluruhnya terdegradasi, pada waktu operasi 160 hari sampai 400 hari, substrat terdegradasi seluruhnya sebelum mencapai ketinggian reaktor 3,5 meter. Berdasarkan grafik dapat dilihat semakin lama waktu operasinya, maka substrat akan lebih cepat terdegradasi (sepenuhnya terdegradasi pada ketinggian reaktor yang lebih rendah). Pada profil biomassa, dapat diamati bahwa konsentrasi biomassa tertinggi pada ketinggian 2,5 meter. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari $167,68 \text{ kg/m}^3$ hingga $2.454,39 \text{ kg/m}^3$. Pada bagian akhir reaktor, dapat diamati konsentrasi biomassa semakin kecil seiring dengan waktu operasi reaktor.



Gambar 4. 34 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran $150 \text{ m}^3/\text{h}$

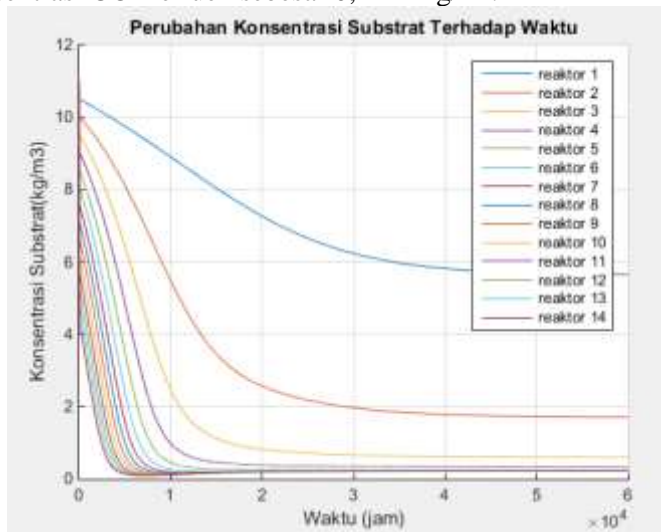


Gambar 4. 35 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $150 \text{ m}^3/\text{h}$

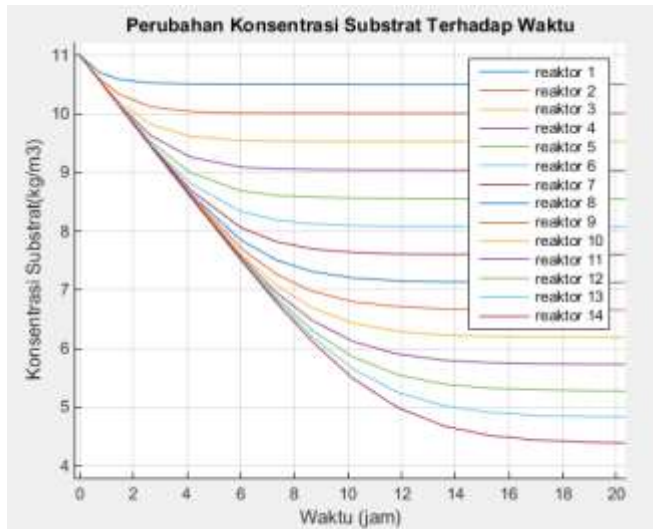
4.4.6 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=175 \text{ m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $175 \text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.37** dan **4.39**. Pada

variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 14 jam. Pada awal operasi, saat HRT tercapai, total COD *removal* diperoleh sebesar 57,81%. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 60.800 jam atau 2.533 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 48,55% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $5,659 \text{ kg/m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 97,98% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,2221 \text{ kg/m}^3$.

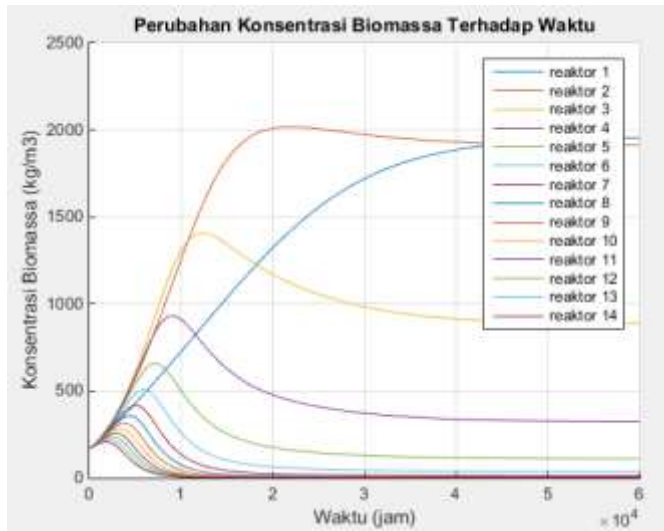


Gambar 4. 36 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $175 \text{ m}^3/\text{h}$



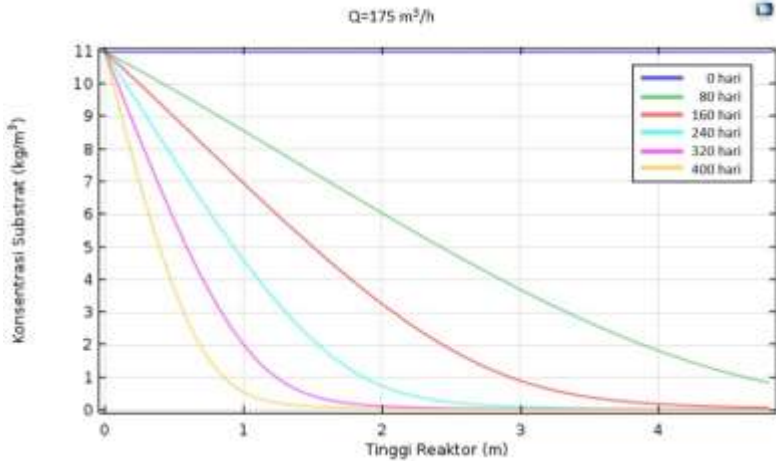
Gambar 4. 37 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $175 \text{ m}^3/\text{h}$ untuk 20 jam Pertama

Gambar 4.39 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran $175 \text{ m}^3/\text{h}$. Pada *steady state*, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 1 yakni sebesar 1.955 kg/m^3 sedangkan pada reaktor 14, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,004919 \text{ kg/m}^3$. Tingginya laju aliran menyebabkan besarnya biomassa yang terseret dari reaktor 1 ke reaktor 2 sehingga perbedaan konsentrasi biomassa pada reaktor 1 dan reaktor 2 pada **Gambar 4.39** terlihat lebih besar dibandingkan variasi sebelumnya.

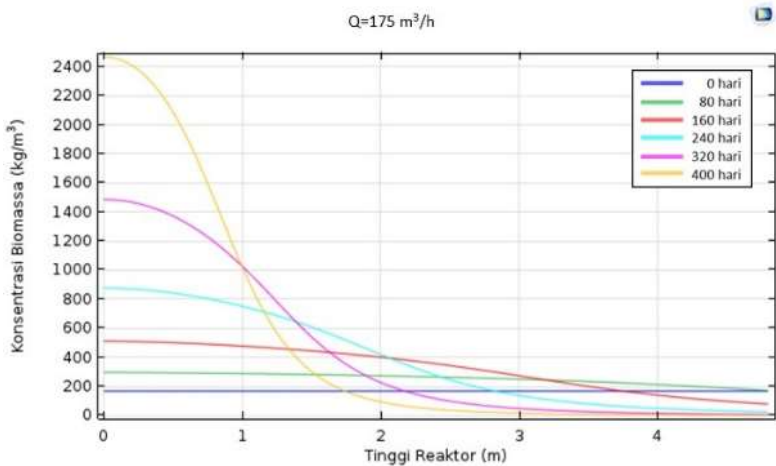


Gambar 4. 38 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $175 \text{ m}^3/\text{h}$

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada **Gambar 4.40** dan **4.42**. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, substrat dengan waktu operasi 120 hari s.d. 400 hari telah terdegradasi sebelum mencapai ketinggian reaktor 4 meter, sedangkan pada waktu operasi 80 hari, belum seluruh substrat terdegradasi. Pada profil biomassa, dapat diamati bahwa konsentrasi biomassa tertinggi pada ketinggian sebelum 3 meter. Meningkatnya konsentrasi biomassa pada bagian tengah ketinggian reaktor merupakan akibat tingginya laju aliran pada reaktor UASB. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari $168,7 \text{ kg/m}^3$ hingga $2.467,7 \text{ kg/m}^3$. Pada bagian akhir reaktor, dapat diamati konsentrasi biomassa semakin kecil seiring dengan waktu operasi reaktor.



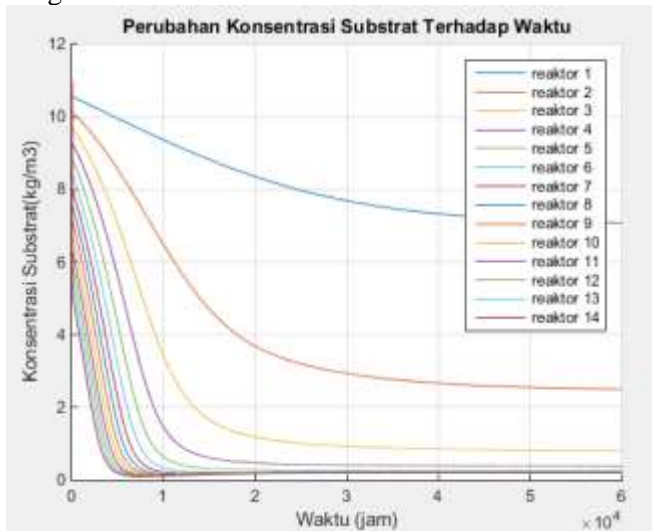
Gambar 4. 39 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran $175 \text{ m}^3/\text{h}$



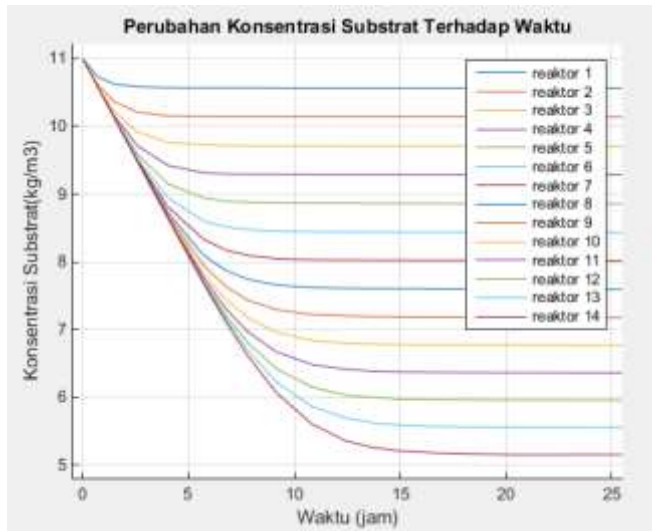
Gambar 4. 40 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $175 \text{ m}^3/\text{h}$

4.4.7 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=200 \text{ m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $200 \text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.42** dan **4.44**. Pada variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 12,3 jam. Pada awal operasi, saat HRT tercapai, dapat diamati bahwa COD terdegradasi hingga $5,3859 \text{ kg/m}^3$ ketika HRT tercapai, total COD *removal* diperoleh sebesar 51,04%. Hal ini dikarenakan laju aliran *upflow* yang lambat mengakibatkan bakteri methanogen dapat mendegradasi seluruh substrat yang tersedia. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 78.470 jam atau 3.270 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 35,97% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $7,043 \text{ kg/m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 98,17% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,2018 \text{ kg/m}^3$.

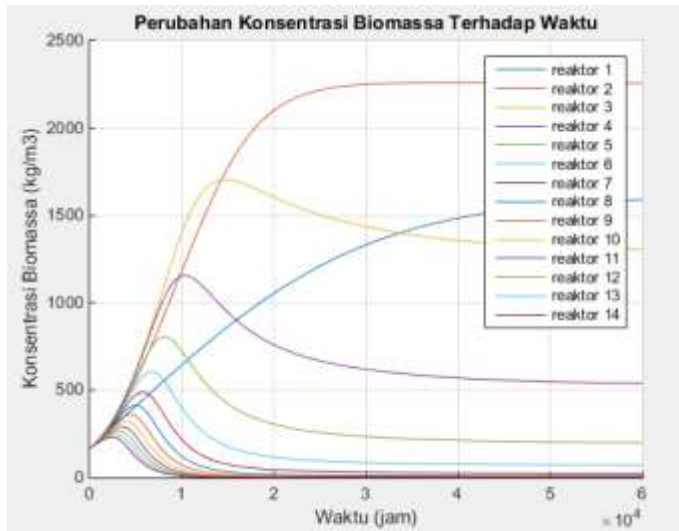


Gambar 4. 41 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $200 \text{ m}^3/\text{h}$



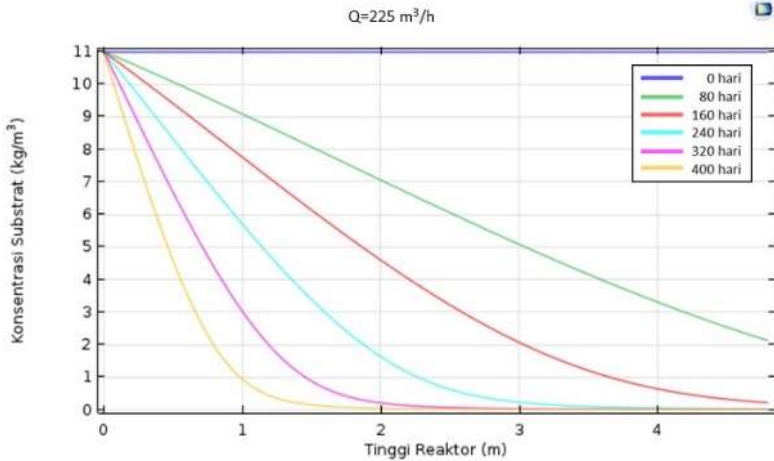
Gambar 4. 42 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $200 \text{ m}^3/\text{h}$ untuk 25 jam Pertama

Gambar 4.44 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran $200 \text{ m}^3/\text{h}$. Steady state tercapai di saat yang sama dengan ketika steady state untuk persamaan konsentrasi substrat tercapai. Pada keadaan ini, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 2 yakni sebesar 2.256 kg/m^3 sedangkan pada reaktor 14, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,016 \text{ kg/m}^3$.

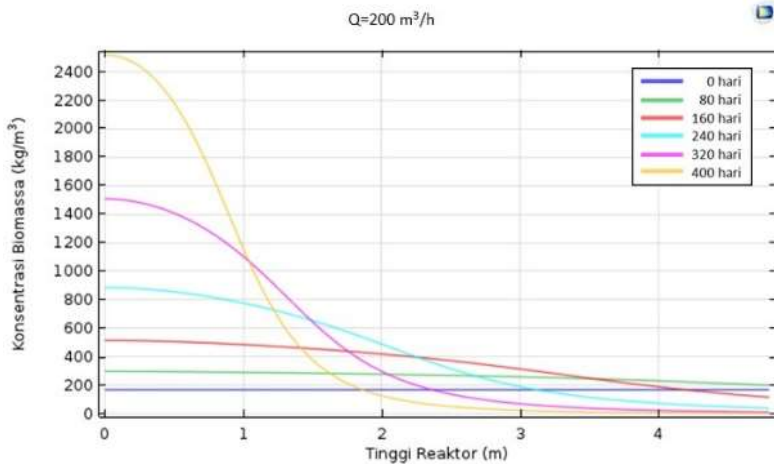


Gambar 4. 43 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 200 m³/h

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada **Gambar 4.45** dan **4.46**. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, pada waktu operasi 240 s.d. 400 hari, seluruh substrat telah terdegradasi sebelum mencapai ketinggian reaktor 4 meter, sedangkan untuk substrat dengan waktu operasi 80 s.d. 160 hari belum sepenuhnya terdegradasi. Berdasarkan grafik dapat dilihat semakin lama waktu operasinya, maka substrat akan lebih cepat terdegradasi. Pada profil biomassa, dapat diamati bahwa konsentrasi biomassa tertinggi pada ketinggian 3,5 meter. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari 167,68 kg/m³ hingga 2.519,84 kg/m³. Pada bagian akhir reaktor, dapat diamati konsentrasi biomassa semakin kecil seiring dengan waktu operasi reaktor.



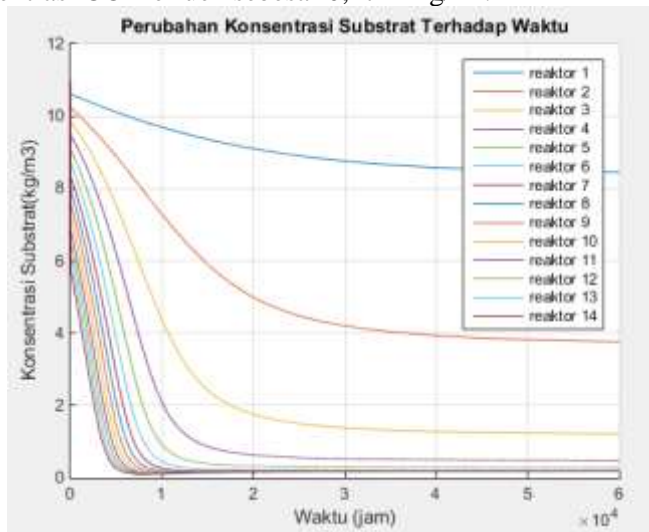
Gambar 4.44 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $200 \text{ m}^3/\text{h}$



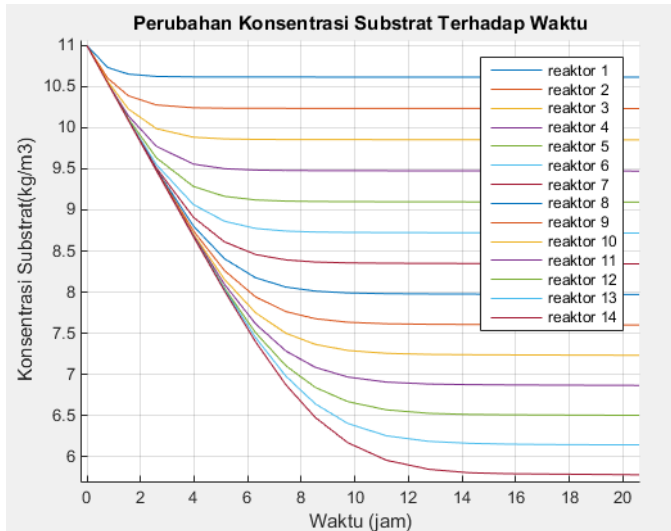
Gambar 4.45 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $200 \text{ m}^3/\text{h}$

4.4.8 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=225 \text{ m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $225 \text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.47** dan **4.49**. Pada variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 11 jam. Pada awal operasi, saat HRT tercapai, dapat diamati bahwa COD terdegradasi hingga $5,99 \text{ kg}/\text{m}^3$, total COD *removal* diperoleh sebesar 45,49%. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 80.690 jam atau 3.362 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 23,52% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $8,413 \text{ kg}/\text{m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 98,44% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,1712 \text{ kg}/\text{m}^3$.

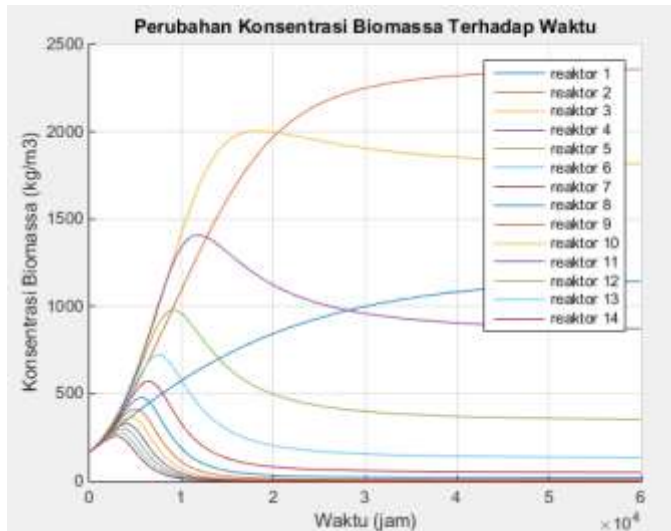


Gambar 4. 46 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $225 \text{ m}^3/\text{h}$



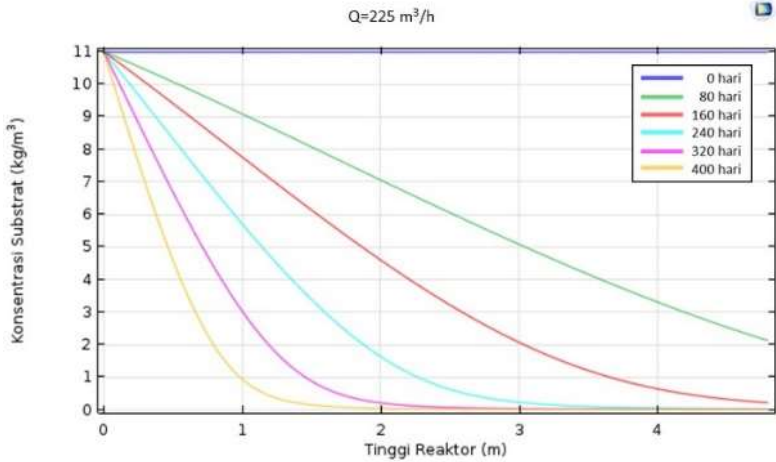
Gambar 4. 47 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $225 \text{ m}^3/\text{h}$ untuk 20 jam Pertama

Gambar 4.49 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran $225 \text{ m}^3/\text{h}$. *Steady state* tercapai di saat yang sama dengan ketika *steady state* untuk persamaan konsentrasi substrat tercapai. Pada keadaan ini, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 2 yakni sebesar 2365 kg/m^3 dan reaktor 1, 1161 kg/m^3 , sedangkan pada reaktor 15, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,0487 \text{ kg/m}^3$.

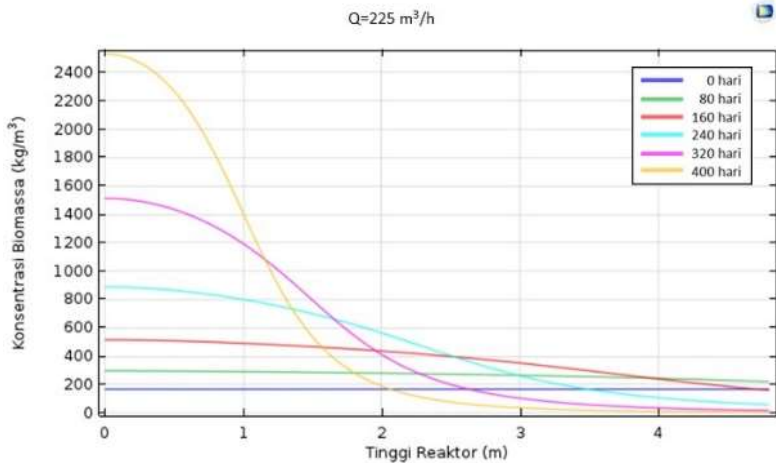


Gambar 4. 48 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $225 \text{ m}^3/\text{h}$

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada **Gambar 4.50** dan **4.51**. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, substrat belum terdegradasi seutuhnya pada waktu operasi 80 s.d. 160 hari, sedangkan untuk 240 s.d. 400 hari, susbtrat telah terdegradasi seluruhnya pada sebelum ketinggian 3,5 m. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari $167,68 \text{ kg/m}^3$ hingga $2.532,35 \text{ kg/m}^3$. Pada bagian akhir reaktor, dapat diamati konsentrasi biomassa semakin kecil seiring dengan waktu operasi reaktor.



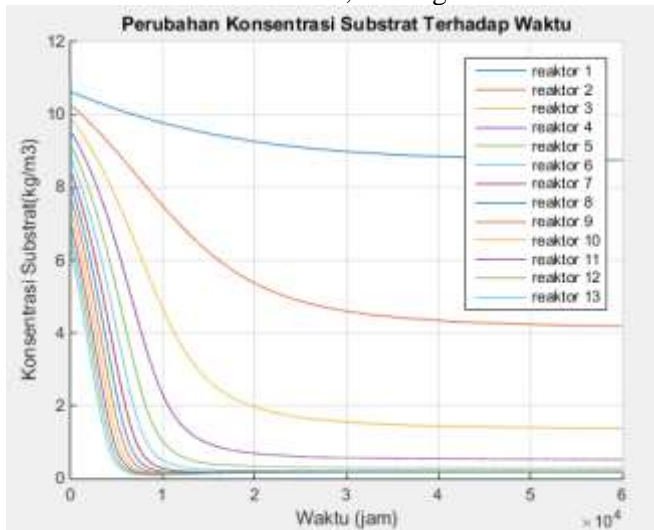
Gambar 4. 49 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran $225 \text{ m}^3/\text{h}$



Gambar 4. 50 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $225 \text{ m}^3/\text{h}$

4.4.9 Simulasi dengan Laju Aliran $Q=250 \text{ m}^3/\text{h}$

Pada simulasi model pendahuluan dengan laju aliran $250 \text{ m}^3/\text{h}$, diperoleh hasil seperti pada **Gambar 4.52** dan **4.54**. Pada variasi laju aliran influen ini, didapatkan nilai HRT sebesar 10 jam. Pada awal operasi, saat HRT tercapai, dapat diamati bahwa COD tidak sepenuhnya terdegradasi yakni menyisakan konsentrasi COD sebesar $6,4935 \text{ kg/m}^3$, total COD *removal* diperoleh sebesar 40,69%. Hal ini dikarenakan laju aliran *upflow* yang sangat cepat mengakibatkan bakteri methanogen belum dapat mendegradasi seluruh substrat yang tersedia. Pada laju aliran ini, diperoleh waktu untuk mencapai *steady state* sebesar 82.570 jam atau 3.440 hari. Ketika mencapai *steady state* reaktor 1 mampu mendegradasi COD sebesar 20,69% dengan menyisakan konsentrasi COD sebesar $8,724 \text{ kg/m}^3$ sedangkan secara keseluruhan reaktor UASB dapat mendegradasi COD sebesar 98,45% dengan menyisakan konsentrasi COD efluen sebesar $0,1743 \text{ kg/m}^3$.

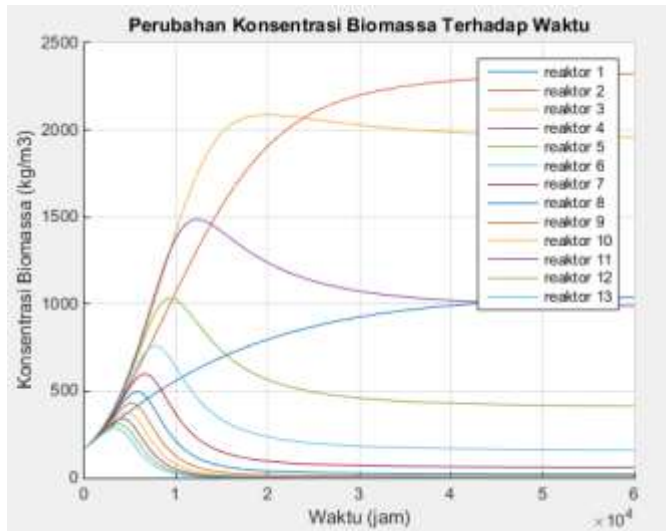


Gambar 4. 51 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $250 \text{ m}^3/\text{h}$



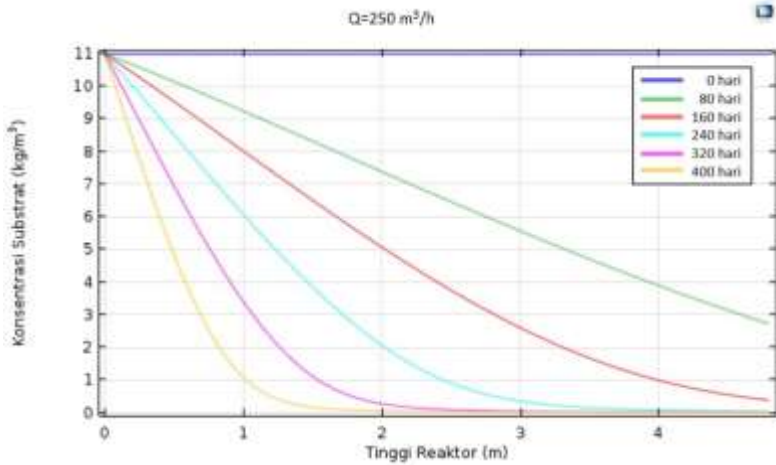
Gambar 4. 52 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran $250 \text{ m}^3/\text{h}$ untuk 20 jam Pertama

Gambar 4.54 menunjukkan profil konsentrasi biomassa dengan laju aliran $250 \text{ m}^3/\text{h}$. *Steady state* tercapai di saat yang sama dengan ketika *steady state* untuk persamaan konsentrasi substrat tercapai. Pada keadaan ini, diperoleh nilai konsentrasi biomassa paling tinggi pada reaktor 2 yakni sebesar 2332 kg/m^3 dan reaktor 1, 1050 kg/m^3 , sedangkan pada reaktor 15, diperoleh nilai konsentrasi biomassa sebesar $0,1743 \text{ kg/m}^3$.

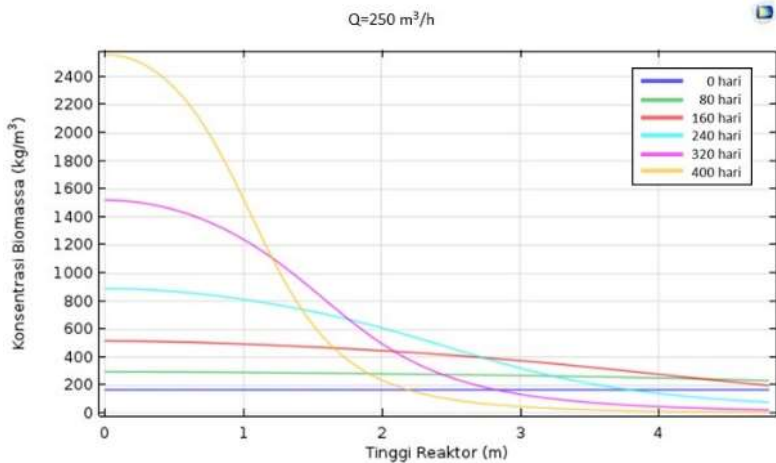


Gambar 4. 53 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Pendahuluan dengan Laju Aliran 250 m³/h

Simulasi dengan model utama ditunjukkan pada **Gambar 4.55** dan **4.56**. Pada grafik degradasi substrat, dapat diamati bahwa untuk waktu operasi 80 hari hingga 400 hari, pada waktu operasi 240 s.d. 400 hari, substrat telah terdegradasi seluruhnya sebelum mencapai ketinggian reaktor 4 meter, sedangkan pada waktu operasi 80 s.d. 160 hari, substrat belum terdegradasi seluruhnya. Pada profil biomassa, dapat diamati bahwa konsentrasi biomassa tertinggi pada ketinggian sebelum 4 meter. Selain itu, dapat diamati peningkatan konsentrasi biomassa dari 168,67 kg/m³ hingga 2.559 kg/m³. Tingginya konsentrasi biomassa dalam reaktor disebabkan oleh tingginya flux massa akibat tingginya laju aliran pada reaktor UASB yang menyebabkan perpindahan massa secara dispersi terjadi lebih besar dibanding variasi sebelumnya. Konsentrasi biomassa di bagian akhir yang tinggi disebabkan oleh banyaknya biomassa akibat tercukupinya nutrient biomassa. Pada bagian akhir reaktor, dapat diamati konsentrasi biomassa semakin kecil seiring dengan waktu operasi reaktor.



Gambar 4. 54 Respon Profil Konsentrasi Substrat pada Model Utama dengan Laju Aliran $250 \text{ m}^3/\text{h}$

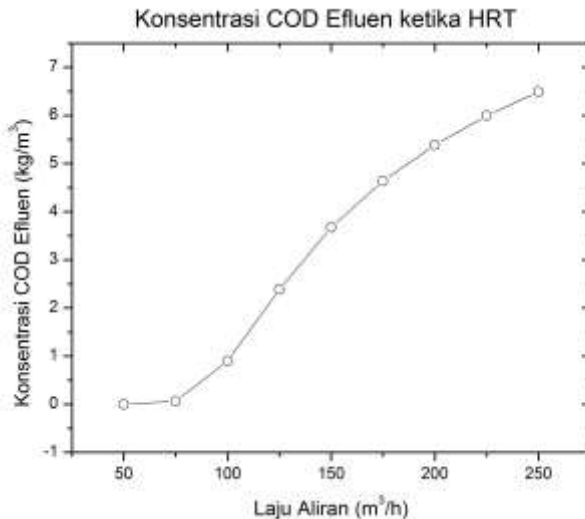


Gambar 4. 55 Respon Profil Konsentrasi Biomassa pada Model Utama dengan Laju Aliran $250 \text{ m}^3/\text{h}$

4.5 Analisis Perbandingan Variasi Simulasi

Berdasarkan variasi laju aliran yang telah dilakukan pada sub-bab sebelumnya, analisis pengaruh laju aliran dapat diperoleh dengan membandingkan beberapa besaran hasil pengamatan, sebagai berikut:

4.5.1 Pengaruh Laju Aliran terhadap COD *Removal* ketika HRT Tercapai

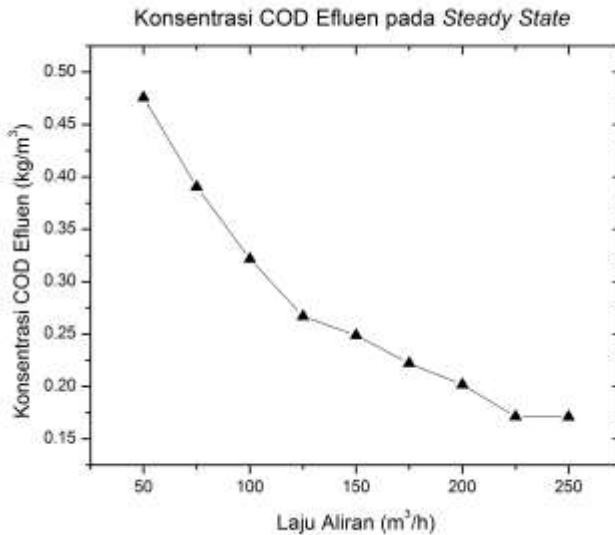


Gambar 4. 56 Pengaruh Laju Aliran terhadap COD *Removal* saat HRT Tercapai

Pada model pendahuluan, dilakukan perbandingan nilai konsentrasi substrat atau COD efluen ketika HRT tercapai. Grafik di atas menunjukkan terjadi peningkatan konsentrasi COD seiring dengan ditingkatkannya laju aliran influen. Peningkatan ini disebabkan oleh semakin kecilnya nilai HRT yang mengakibatkan substrat meninggalkan reaktor sebelum sempat terdegradasi seutuhnya. PT. GGF memiliki kolam penampungan untuk menampung substrat sebelum limbah cair dilepaskan ke lingkungan, kolam tersebut mampu menampung limbah cair selama 3 minggu untuk menurunkan kadar COD efluen. Dengan

kapasitas penampungan, diestimasikan konsentrasi COD influen mampu ditingkatkan hingga 200 m³/s.

4.5.2 Pengaruh Laju Aliran terhadap COD Removal ketika *Steady State* Tercapai

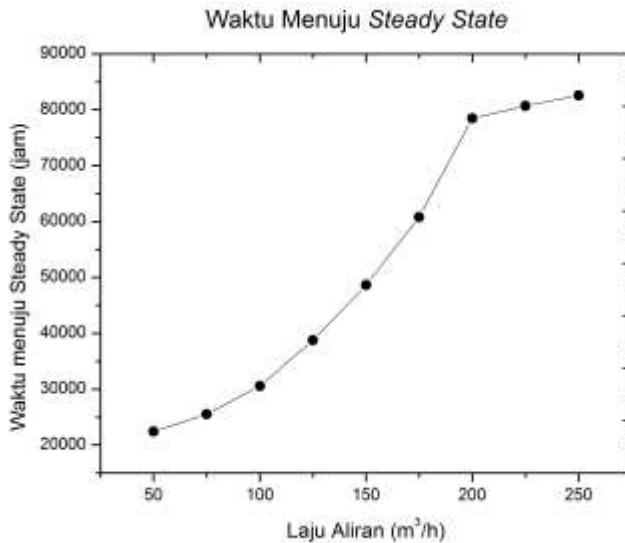


Gambar 4. 57 Pengaruh Laju Aliran terhadap COD Removal ketika *Steady State* Tercapai

Jika ditinjau pengaruh laju aliran terhadap COD Removal ketika *steady state* tercapai, data yang diperoleh dari simulasi menunjukkan tren yang turun. Semakin tinggi laju aliran influen, maka akan semakin rendah konsentrasi COD pada efluen ketika *steady state* tercapai. Hal ini disebabkan oleh semakin besar laju aliran influen, maka semakin banyak substrat yang diproses oleh biomassa. Ketika *steady state* belum tercapai, konsentrasi COD efluen semakin rendah sebab belum sempatnya substrat terdegradasi seluruhnya, namun ketika *steady state* tercapai, konsentrasi biomassa untuk laju aliran influen tinggi akan mengakibatkan banyaknya konsentrasi biomassa di dalam reaktor

sehingga konsentrasi COD efluen semakin rendah pada laju aliran influen tinggi.

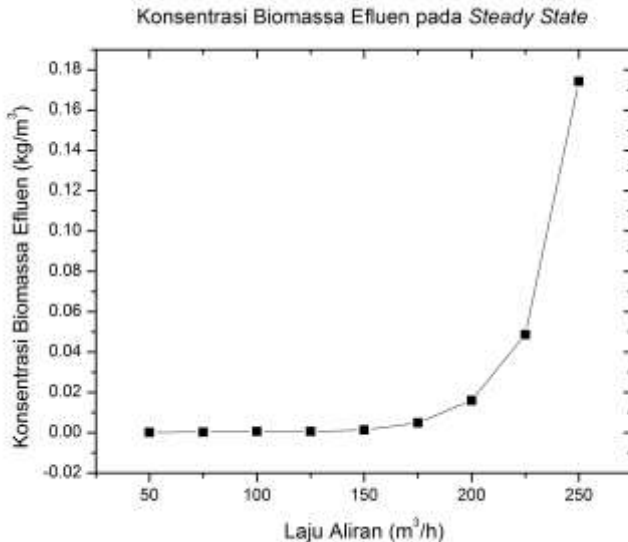
4.5.3 Pengaruh Laju Aliran terhadap Waktu menuju *Steady State*



Gambar 4. 58 Pengaruh Laju Aliran terhadap Waktu menuju *Steady State*

Pada sub-bab ini dibahas pengaruh laju aliran terhadap waktu reaktor menuju *steady state*. Semakin sedikit waktu yang diperlukan untuk mencapai *steady state*, sistem semakin baik karena semakin stabil. Pada laju aliran rendah, *steady state* akan lebih cepat tercapai, sebaliknya, semakin besar laju aliran influen, semakin lama *steady state* akan tercapai. Waktu menuju *steady state* terendah diperoleh ketika laju aliran sebesar $50 \text{ m}^3/\text{s}$ dengan waktu menuju *steady state* sebesar 22.430 jam atau sebesar 934,5 hari. Waktu menuju *steady state* tertinggi diperoleh ketika laju aliran sebesar 82.750 hari atau 3440 hari.

4.5.4 Pengaruh Laju Aliran terhadap Konsentrasi Biomassa pada Efluen



Gambar 4. 59 Pengaruh Laju Aliran Influen terhadap Konsentrasi Biomassa Efluen pada *Steady State*

Pada *steady state*, konsentrasi biomassa efluen meningkat secara eksponensial seiring dengan peningkatan laju aliran influen. Peningkatan paling signifikan terjadi ketika laju aliran ditingkatkan dari $225 \text{ m}^3/\text{h}$ menjadi $250 \text{ m}^3/\text{h}$, yakni meningkat sebesar $0,126 \text{ kg}/\text{m}^3$. Pada laju aliran $50 \text{ m}^3/\text{h}$, hingga laju aliran $250 \text{ m}^3/\text{h}$, peningkatan terjadi secara signifikan. Adapun hal ini diakibatkan oleh tingginya perpindahan massa secara dispersi sehingga mengakibatkan lebih besar fraksi biomassa yang terbuang bersama dengan efluen.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang diperoleh dari tugas akhir ini adalah:

1. Perilaku bakteri methanogen sebagai biomassa, konsentrasi COD sebagai substrat dan hubungannya dengan aliran dalam reaktor dapat dipahami dengan melakukan estimasi parameter kinetika Monod. Pada kasus ini diperoleh nilai K_s sebesar $0,93 \text{ kg/m}^3$, K_d sebesar $0,00070 \text{ h}^{-1}$, Y sebesar $0,28047$ dan μ_{\max} sebesar $0,001071 \text{ h}^{-1}$.
2. Pengaruh aliran influen mempengaruhi konsentrasi bakteri yang terbuang. Semakin besar laju aliran influen, maka semakin besar bakteri yang diperkirakan akan terbuang. Pada simulasi, diperoleh hubungan eksponensial antara peningkatan laju aliran dan konsentrasi bakteri yang terbuang.
3. Laju aliran influen yang baik untuk reaktor UASB PT. GGF diperoleh pada rentang berkisar 150 hingga 175 m^3/h , di mana tidak terlalu banyak konsentrasi bakteri yang terbuang ($0,001393 \text{ s.d } 0,4919 \text{ kg/m}^3$), *settling time* yang tidak terlalu lama ($48.640 \text{ s.d. } 60.800 \text{ hari}$), COD *removal* yang cukup baik, yaitu sebesar $57,81\% \text{ s.d. } 66,57\%$ saat pertama kali mencapai HRT dan $97,74\% \text{ s.d. } 97,98\%$ saat mencapai *steady state*.

5.2 Saran

Adapun saran untuk penelitian pada tugas akhir ini adalah:

1. Diperlukannya pengujian laboratorium untuk mengetahui jenis bakteri
2. Diperlukannya pengukuran parameter model Monod dengan substrat yang tetap

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Bhunia, P. & Ghangrekar, M.M., 2008. Analysis , evaluation , and optimization of kinetic parameters for performance appraisal and design of UASB reactors. , 99, pp.2132–2140.
- Bolle, W.L. et al., 1986. Modeling the liquid flow in up-flow anaerobic sludge blanket reactors. *Biotechnology and bioengineering*, 28(11), pp.1615–20. Available at: <http://www.mendeley.com/research/modeling-liquid-flow-upflow-anaerobic-sludge-blanket-reactors-1/>.
- Chetty, S. & Pillay, K., 2015. Application of the DIY carbon footprint calculator to a wastewater treatment works. *Water SA*, 41(2), pp.263–272.
- Environ, J., 2013. Amodel to Predict the Behavior of UASB Reactors. , 7(3), pp.605–614.
- Fernandes, C. & Karney, B.W., 2001. Numerical Solution of the Advection- Dispersion-Reaction Equation Under Transient Hydraulic Conditions. *29th IAHR Congress*, pp.58–64. Available at: <http://hydratex.com/wp-content/uploads/2012/12/reaction.pdf>.
- Gómez, R., 2011. *Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor: Modelling*, Available at: <http://medcontent.metapress.com/index/A65RM03P4874243N.pdf%5Cnhttp://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:394741/FULLTEXT02.pdf>.
- Incropera, F.P. & Dewitt, D.P., 2011. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* 7th ed., Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc.
- Kalyuzhnyi, S. & Fedorovich, V., 1997. Integrated mathematical model of UASB reactor for competition between sulphate reduction and methanogenesis. *Water Science and Technology*, 36(6–7), pp.201–208. Available at: [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223\(97\)00524-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1223(97)00524-6).
- Karthikeyan, K. & Kandasamy, J., 2009. Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Uasb) Reactor in Wastewater Treatment. *WATER AND WASTEWATER TREATMENT*

- TECHNOLOGIES - Volume II*, pp.180–198.
- Korsak, L., 2008. *ANAEROBIC TREATMENT OF WASTEWATER IN A UASB REACTOR*,
- Monod, J., 1949. The Growth of Bacterial Cultures. *Annual Review of Microbiology*, 3(1), pp.371–394.
- Paulo, L.M., Stams, A.J.M. & Sousa, D.Z., 2015. Methanogens, sulphate and heavy metals: a complex system. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 14(4), pp.537–553.
- Pavlostathis, S.G. & Giraldo-Gomez, E., 1991. Kinetics of anaerobic treatment. *Water Science and Technology*, 24(8), pp.35–59.
- Seghezzo, L., Scientific, N. & Seghezzo, L., 2004. *Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions / Anaerobic treatment of domestic wastewater in subtropical regions Lucas Seghezzo*,
- Simkins, S. & Alexander, M., 1985. Nonlinear estimation of the parameters of Monod kinetics that best describe mineralization of several substrate concentrations by dissimilar bacterial densities. *Applied and Environmental Microbiology*, 50(4), pp.816–824.
- Tauzene, M. et al., 2011. DETERMINATION OF KINETIC PARAMETERS OF AN UPFLOW ANAEROBIC SLUDGE BLANKET REACTOR (UASB), TREATING SWINE WASTEWATER. , pp.1204–1210.

LAMPIRAN A
DATA LABORATORIUM DAN DATA PLANT SELAMA
DUA TAHUN

Tabel 1. Data Laboratorium Plant Reaktor A Selama Dua Tahun

Minggu ke-	Influen		Efluen Reaktor A		Reaktor A		
	COD t	FT 100	CODt	Xe	Vb	M	X
	(kg/m3)	m3	(kg/m3)	(kg/m3)	(m3)	(ton)	(kg/m3)
4	11	4,426	1.490	2.041	376.03214	391.8254899	160.1248426
5	12	4,690	1.801	2.076	392.665312	410.335251	167.6891095
6	10	5,176	1.378	0.848	412.870024	426.4947348	174.2929035
7	13	4,868	2.229	0.571	524.50616	542.8638756	221.8487436
8	11	5,278	1.844	1.367	494.65829	513.9499633	210.0326781
9	10	5,277	1.592	1.557	517.36308	536.505514	219.2503122
10	11	5,516	1.945	1.453	458.789824	473.0123085	193.3029459
11	9	5,252	1.258	1.367	421.44172	436.6136219	178.428125
12	9	5,520	0.867	0.744	538.894364	560.4501386	229.0356104
13	8	4,683	0.665	0.484	672.46996	697.3513485	284.9821612
14	9	5,518	1.023	0.986	582.569196	607.6196714	248.3120848
15	11	5,676	1.043	1.003	578.895612	600.8936453	245.5634022
16	12	5,498	1.847	1.817	1056.1554	1095.23315	447.5819983
17	8	5,525	1.931	1.713	882.6806	915.3397822	374.0661145
18	12	5,516	2.173	1.471	1071.462	1111.106094	454.0686939
19	11	5,345	1.811	1.090	979.6224	1015.868429	415.1485201
20	11	5,518	1.510	1.488	979.6224	1016.848051	415.5488562
21	11	5,492	1.632	1.782	848.49586	879.041711	359.2324115
22	14	5,320	2.042	1.695	1080.64596	1121.710506	458.402332
23	15	5,470	2.417	2.595	1135.2395	1173.837643	479.7047989
24	12	5,278	1.761	1.609	1022.48088	1058.267711	432.4755663
25	12	5,209	1.750	1.920	1186.2615	1232.525699	503.6884751
26	12	5,317	1.731	2.855	1176.0571	1220.74727	498.8750592
27	10	4,390	1.459	1.522	1195.44546	1237.286051	505.6338582

28	14	4,439	2.694	1.107	1415.8605	1462.583897	597.7049025
29	16	4,809	2.510	2.474	1191.3637	1235.444157	504.881143
30	14	4,952	2.102	1.644	1153.0972	1193.455602	487.7219461
31	13	4,858	2.056	1.522	1158.1994	1201.052778	490.8266358
32	15	5,019	1.966	5.190	1346.9808	1398.16607	571.3796773
33	17	4,385	2.676	3.806	1413.3094	1465.601848	598.9382296
34	15	4,508	2.397	1.990	1298.5099	1345.256256	549.7573586
35	14	4,926	2.762	1.436	1316.3676	1365.073201	557.8558239
36	14	4,149	2.593	1.730	1362.2874	1414.054321	577.8726282
37	11	5,043	1.607	1.592	1436.2693	1490.847533	609.2552241
38	14	4,528	2.031	1.073	1313.8165	1361.113894	556.2377989
39	10	3,819	0.972	1.471	1487.2913	1542.321078	630.2905918
40	8	3,664	0.488	1.644	1006.66406	1043.91063	426.6083491
41	8	4,796	0.427	1.246	1387.7984	1434.983546	586.4256418
42	6	3,384	0.388	0.640	1074.0131	1111.603559	454.2719896
43	7	4,317	0.592	0.848	1168.4038	1208.129529	493.718647
44	13	4,946	2.082	2.422	1132.6884	1172.332494	479.0896992
45	12	3,337	1.579	3.633	970.43844	1004.403785	410.4633369
46	7	4,231	0.625	1.384	1318.9187	1365.080855	557.8589516
47	7	3,935	0.539	1.107	963.29536	996.0474022	407.0483867
48	9	4,633	1.324	1.851	965.84646	997.7193932	407.7316686
49	10	4,627	0.948	1.349	1078.09486	1113.67199	455.1172825
50	8.745	4,373	1.376	0.9688	1209.2214	1250.334928	510.96646
51	6.245	4,214	0.704	0.3979	912.27336	944.2029276	385.8614334
52	8.455	3,695	0.842	1.2283	1409.48275	1470.090508	600.772582
53	9.625	4,772	1.843	1.2975	1186.2615	1227.780653	501.7493472
54	7.43	4,177	1.322	1.6089	987.2757	1022.817625	417.9884043
55	9.145	5,279	1.39	1.2456	1174.52644	1216.809392	497.2657915
56	8.045	5,433	1.078	1.1591	1206.6703	1250.110431	510.8747163
57	9.135	5,310	1.153	1.4013	1318.9187	1366.399773	558.3979457

58	9.74	5,122	1.675	2.076	818.64799	847.3006697	346.2610011
59	10.295	5,276	1.533	1.903	1015.3378	1051.889961	429.8692116
60	7.965	2,495	0.834	0.6401	912.27336	946.0274743	386.6070594
61	9.48	5,222	1.462	1.9376	885.2317	917.9852729	375.1472304
62	8.155	4,495	0.868	0.4671	691.3481	714.8539354	292.1348326
63	5.975	2,918	0.853	0.5709	785.22858	812.7115803	332.1256969
64	10.89	4,876	1.46	5.709	859.7207	892.3900866	364.6874077
65	11.485	5,424	1.831	2.1625	964.3158	999.0311688	408.2677437
66	11.66	4,140	1.741	2.0241	965.84646	1001.582779	409.3104941
67	11.7	5,517	1.365	2.595	979.6224	1014.888806	414.7481841
68	8.04	5,120	0.837	1.4705	1067.89046	1108.470297	452.9915396
69	8.8	5,203	1.01	1.7819	1034.72616	1070.941576	437.6549144
70	8.465	4,564	0.8375	1.73	1047.48166	1086.238481	443.9062041
71	8.97	5,416	1.06	2.0587	1326.572	1375.655164	562.1802877
72	10.805	5,224	1.107	3.287	1471.9847	1527.920119	624.4054428
73	8.545	5,578	1.046	2.8545	1440.35106	1493.644049	610.3980585
74	8.135	2,378	0.439	1.0034	1030.13418	1066.188876	435.7126589
75	11.66	3,002	1.057	2.5085	1015.3378	1050.874623	429.4542799
76	10.785	4,745	1.7215	4.325	1096.973	1136.464028	464.4315603
77	12.04	4,564	1.862	1.2975	1142.8928	1185.179834	484.3399402
78	10.16	4,202	1.106	2.422	1548.5177	1608.90989	657.5030201
79	8.41	4,223	0.9185	1.4186	1418.4116	1473.729652	602.259768
80	12.235	4,087	2.155	1.4705	1349.5319	1402.163644	573.0133405
81	15.38	3,096	1.7875	2.1625	1280.6522	1331.878288	544.2902689
82	12.975	3,905	1.7655	1.5051	1216.8747	1266.766563	517.6814723
83	13.095	3,689	2.291	1.0034	974.00998	1011.996369	413.5661501
84	7.695	3,590	0.887	0.8823	864.8229	896.8213473	366.4983029
85	8.05	3,329	0.8965	0.7093	977.0713	1014.200009	414.4666978
86	10.6	5,449	1.653	2.3355	1125.0351	1170.036504	478.1514115
87	10.56	5,670	1.477	1.73	1168.4038	1213.971548	496.1060679

88	9.915	5,760	1.2775	1.8857	1385.2473	1440.657192	588.744255
89	8.655	5,758	1.383	2.1106	1428.10578	1482.3738	605.792317
90	10.42	5,971	1.383	2.1625	1344.4297	1399.551318	571.9457776
91	7.82	5,592	1.2795	1.6781	1403.105	1456.42299	595.1871639
92	10.725	5,501	1.4705	1.903	1314.83694	1359.541396	555.5951761
93	10.92	5,522	1.907	4.498	1125.0351	1168.911469	477.6916506
94	9.57	5,150	1.4945	3.633	1313.8165	1363.741527	557.3116171
95	12.76	5,361	1.939	6.1415	1410.7583	1462.956357	597.8571136
96	11.585	5,148	1.956	5.017	1474.5358	1532.042696	626.0901905
97	12.685	3,851	2.089	3.806	1372.4918	1423.273997	581.6403746
98	12.285	3,155	2.079	3.0275	1262.7945	1310.780691	535.6684475
99	8.665	3,359	0.937	2.1971	1227.0791	1273.708106	520.5182288

LAMPIRAN B

DATA ESTIMASI PARAMETER MONOD

Tabel 2. Data Estimasi Parameter Monod

Reaktor A				
VbX/QXe	1/teta_c	Q(S0-Se)/VbX	1/Se	XVb/Q(S0-Se)Y
teta_c	x_d	y_d	x_s	y_s
201.91	0.00495	0.023946064	0.671141	148.8971209
215.58	0.00464	0.022966555	0.555144	155.2474869
572.61	0.00175	0.017721525	0.725689	201.1960072
1,353.16	0.00074	0.013589268	0.448699	262.3761644
501.22	0.00200	0.01405705	0.542299	253.6449617
487.04	0.00205	0.01121954	0.628141	317.7937901
402.27	0.00249	0.015683096	0.514051	227.3466966
362.78	0.00276	0.016502463	0.794913	216.0586515
1,094.56	0.00091	0.010405547	1.152959	342.6537746
2,608.53	0.00038	0.006073781	1.503006	587.0314126
966.97	0.00103	0.007854994	0.977199	453.9150256
934.63	0.00107	0.010332641	0.958466	345.0715147
1,716.30	0.00058	0.003132685	0.541516	1138.160989
1,271.80	0.00079	0.002620802	0.517777	1360.46149
2,182.64	0.00046	0.003100104	0.460123	1150.122873
2,461.64	0.00041	0.003550336	0.552079	1004.271196
1,810.51	0.00055	0.00366662	0.662252	972.4214466
1,131.89	0.00088	0.004674451	0.612745	762.7633095
1,929.68	0.00052	0.003777388	0.489716	943.9061619
1,387.10	0.00072	0.003534622	0.413736	1008.735868
1,816.66	0.00055	0.003557868	0.567859	1002.145146
2,055.51	0.00049	0.002709521	0.571429	1315.915327
1,357.05	0.00074	0.002675472	0.577701	1332.662151
2,624.35	0.00038	0.002171544	0.685401	1641.919288

5,043.70	0.00020	0.001967272	0.371195	1812.408418
1,604.42	0.00062	0.003339476	0.398406	1067.682595
2,256.82	0.00044	0.003182182	0.475737	1120.457622
2,462.70	0.00041	0.003049703	0.486381	1169.130249
979.10	0.00102	0.002638781	0.508647	1351.192019
1,488.51	0.00067	0.002560163	0.373692	1392.684968
2,398.77	0.00042	0.002743507	0.417188	1299.614004
3,421.80	0.00029	0.002309619	0.362056	1543.761246
3,043.78	0.00033	0.002231784	0.385654	1597.60102
3,677.56	0.00027	0.001665412	0.622278	2140.912249
4,566.30	0.00022	0.002468245	0.492368	1444.548719
4,272.47	0.00023	0.001366936	1.028807	2608.387965
1,728.10	0.00058	0.00268368	2.04918	1328.586038
4,317.44	0.00023	0.001355201	2.34192	2630.975555
5,039.44	0.00020	0.001849805	2.57732	1927.500757
4,490.54	0.00022	0.001775325	1.689189	2008.365188
1,497.02	0.00067	0.003098087	0.480307	1150.871623
727.51	0.00137	0.003948471	0.633312	903.0077254
3,554.05	0.00028	0.001271651	1.6	2803.83435
2,337.58	0.00043	0.002482835	1.855288	1436.060024
1,423.02	0.00070	0.003010833	0.755287	1184.223937
2,399.43	0.00042	0.002876039	1.054852	1239.726022
4,224.81	0.00024	0.001800393	0.726744	1980.400422
5,996.08	0.00017	0.002322451	1.420455	1535.23185
4,570.55	0.00022	0.001356074	1.187648	2629.281898
3,046.37	0.00033	0.001968797	0.542594	1811.004625
1,691.16	0.00059	0.002244846	0.75643	1588.305179
3,089.05	0.00032	0.002015479	0.719424	1769.058076
3,507.61	0.00029	0.001713616	0.927644	2080.687458
3,496.03	0.00029	0.001629315	0.867303	2188.342364

911.81	0.00110	0.004260597	0.597015	836.8546201
1,523.95	0.00066	0.003021293	0.652316	1180.123851
3,766.41	0.00027	0.002957844	1.199041	1205.438864
1,139.46	0.00088	0.003631644	0.683995	981.786669
2,855.59	0.00035	0.00546314	1.152074	652.6466403
3,010.30	0.00033	0.002980367	1.172333	1196.329312
365.01	0.00274	0.004525325	0.684932	787.8991877
1,201.37	0.00083	0.003715994	0.54615	959.5010144
1,286.36	0.00078	0.003809553	0.574383	935.9365245
1,032.04	0.00097	0.003859017	0.732601	923.9399012
2,167.82	0.00046	0.002259567	1.194743	1577.956853
1,674.27	0.00060	0.002611128	0.990099	1365.501848
1,770.21	0.00056	0.002490644	1.19403	1431.557315
2,435.32	0.00041	0.001577709	0.943396	2259.921858
1,871.42	0.00053	0.001576563	0.903342	2261.56562
2,029.10	0.00049	0.001294702	0.956023	2753.915801
2,996.29	0.00033	0.002559804	2.277904	1392.880282
1,174.83	0.00085	0.003597831	0.946074	991.0138839
789.03	0.00127	0.002655913	0.580889	1342.476209
2,859.27	0.00035	0.002743467	0.537057	1299.632896
2,819.75	0.00035	0.001325732	0.904159	2689.458096
4,001.19	0.00025	0.001319834	1.088732	2701.477059
3,531.34	0.00028	0.001941136	0.464037	1836.811078
2,122.36	0.00047	0.002961583	0.559441	1203.917086
2,755.10	0.00036	0.002703231	0.566412	1318.977116
2,683.06	0.00037	0.004013103	0.436491	888.4645289
2,366.65	0.00042	0.003260381	1.127396	1093.583913
3,760.27	0.00027	0.002682068	1.115449	1329.38456
1,517.83	0.00066	0.002523914	0.604961	1412.686575
2,205.55	0.00045	0.002380495	0.677048	1497.797853

2,846.92	0.00035	0.001608939	0.782779	2216.057131
2,702.64	0.00037	0.001274852	0.723066	2796.794562
2,341.26	0.00043	0.001784915	0.723066	1997.573756
3,278.52	0.00031	0.001188817	0.781555	2999.19905
2,526.89	0.00040	0.001924545	0.680041	1852.645909
795.87	0.00126	0.002517727	0.524384	1416.158202
1,339.16	0.00075	0.001659866	0.66912	2148.064546
912.01	0.00110	0.001931943	0.51573	1845.551431
1,211.61	0.00083	0.001584073	0.511247	2250.842898
1,382.57	0.00072	0.002013664	0.478698	1770.652585
1,463.93	0.00068	0.00230278	0.481	1548.345754
1,920.46	0.00052	0.001831525	1.067236	1946.73875

LAMPIRAN C
PERBANDINGAN DATA KONSENTRASI SUBSTRAT
LABORATORIUM DENGAN MODEL

Tabel 3. Validasi Model Pendahuluan

Minggu ke	Data Plant (kg/m ³)	Hasil Simulasi
0	0.876	3.4782975
1	0.711333333	2.8387456
2	1.365333333	2.2208936
3	1.49	1.6568045
4	1.801333333	1.1764799
5	1.378	0.80065343
6	2.228666667	0.54739702
7	1.844	0.37806233
8	1.592	0.26682486
9	1.945333333	0.20451143
10	1.258	0.16374622
11	0.867333333	0.13651153
12	0.665333333	0.11887598
13	1.023333333	0.10734859
14	1.043333333	0.099992227
15	1.846666667	0.095628862
16	1.931333333	0.092378284
17	2.173333333	0.097014277
18	1.811333333	0.091458447
19	1.51	0.094947362
20	1.632	0.092143835
21	2.042	0.095530932
22	2.417	0.08909784
23	1.761	0.10276016
24	1.75	0.09903024

25	1.731	0.11052545
26	1.459	0.11554268
27	2.694	0.10998229
28	2.51	0.12444295
29	2.102	0.12107308
30	2.056	0.12512207
31	1.966	0.13172909
32	2.676	0.13653075
33	2.397	0.14425331
34	2.762	0.14770672
35	2.593	0.14436901
36	1.607	0.15741433
37	2.031	0.16561834
38	0.972	0.169647
39	0.488	0.18098512
40	0.427	0.17781934
41	0.388	0.1820952
42	0.592	0.18201296
43	2.082	0.19051356
44	1.579	0.18627043
45	0.625	0.18825352
46	0.539	0.19380869
47	1.324	0.19343906
48	0.948	0.19619
49	1.376	0.20034123
50	0.704	0.19948867
51	0.842	0.20367568
52	1.843	0.20348106
53	1.322	0.2051844
54	1.39	0.20893036

55	1.078	0.20824351
56	1.153	0.21065833
57	1.675	0.21171257
58	1.533	0.21450629
59	0.834	0.21390447
60	1.462	0.21524015
61	0.868	0.21611178
62	0.853	0.22092022
63	1.46	0.21877571
64	1.831	0.22140991
65	1.741	0.22049502
66	1.365	0.22499108
67	0.837	0.22191264
68	1.01	0.22354317
69	0.8375	0.22418707
70	1.06	0.22658619
71	1.107	0.22746618
72	1.046	0.22820665
73	0.439	0.22892757
74	1.057	0.22963298
75	1.7215	0.2303199
76	1.862	0.22853963
77	1.106	0.22970485
78	0.9185	0.23050411
79	2.155	0.23110374
80	1.7875	0.23219661
81	1.7655	0.23274574
82	2.291	0.23330622
83	0.887	0.23385473
84	0.8965	0.23438917

85	1.653	0.23491124
86	1.477	0.23544925
87	1.2775	0.23530379
88	1.383	0.23792816
89	1.383	0.23973776
90	1.2795	0.2420437
91	1.4705	0.23714746
92	1.907	0.23695149
93	1.4945	0.24358504
94	1.939	0.23783428
95	1.956	0.24465813
96	2.089	0.24325893
97	2.079	0.2383172
98	0.937	0.24295891
99	0.937	0.23924236

LAMPIRAN D
PERBANDINGAN DATA LABORATORIUM DAN MODEL
DISTRIBUSI KONSENTRASI BIOMASSA DALAM
REAKTOR

Tabel 4. Konsentrasi Biomassa pada Hari ke-240

Ketinggian Reaktor (m)	Minggu ke - 34	Minggu ke - 35	Standar Deviasi
0	1037	1036	60.6238402
0.3	1037	1036	60.6238402
0.6	1037	1036	60.6238402
0.9	1037	1036	90.50103591
1.2	1037	984.2	66.10756544
2	933.3	1036	392.5933817
3	622.2	569.8	181.6715999
4	62.22	41.44	14.98799964

Tabel 5. Konsentrasi Biomassa Data Plant pada hari ke 320

Ketinggian Reaktor (m)	Minggu ke - 45	Minggu ke - 46	Standar Deviasi
0	1040	932.4	61.2752261
0.3	1040	932.4	61.2752261
0.6	1040	932.4	61.2752261
0.9	1040	828.8	121.0796432
1.2	93.6	932.4	437.0413749
2	45.76	932.4	493.366114
3	45.76	103.6	30.85947558
4	52	124.32	48.91264083

Tabel 6. Konsentrasi Biomassa Hasil Simulasi pada Hari ke-240 dan ke-320

Ketinggian Reaktor (m)	Konsentrasi Biomassa Hari ke 240 (kg/m ³)	Konsentrasi Biomassa Hari ke 320 (kg/m ³)
0	875.7329	1483.251
0.016	875.5837	1482.789
0.032	875.4345	1482.326
0.048	875.2854	1481.863
0.064	874.8354	1480.45
0.08	874.3854	1479.038
0.096	873.9354	1477.625
0.112	873.1948	1475.268
0.128	872.4542	1472.911
0.144	871.7136	1470.555
0.16	870.6925	1467.259
0.176	869.6715	1463.964
0.192	868.6505	1460.668
0.208	867.3591	1456.439
0.224	866.0678	1452.21
0.24	864.7764	1447.981
0.256	863.2246	1442.822
0.272	861.6727	1437.663
0.288	860.1209	1432.504
0.304	858.318	1426.418
0.32	856.5151	1420.332
0.336	854.7123	1414.247
0.352	852.6674	1407.235
0.368	850.6226	1400.224
0.384	848.5777	1393.212

0.4	846.2994	1385.276
0.416	844.021	1377.339
0.432	841.7426	1369.403
0.448	839.2386	1360.54
0.464	836.7345	1351.678
0.48	834.2304	1342.816
0.496	831.5077	1333.028
0.512	828.785	1323.24
0.528	826.0623	1313.451
0.544	823.1269	1302.737
0.56	820.1916	1292.023
0.576	817.2563	1281.309
0.592	814.1134	1269.67
0.608	810.9705	1258.032
0.624	807.8276	1246.394
0.64	804.4812	1233.838
0.656	801.1348	1221.283
0.672	797.7884	1208.727
0.688	794.2415	1195.268
0.704	790.6946	1181.808
0.72	787.1477	1168.349
0.736	783.4023	1154.011
0.752	779.6569	1139.672
0.768	775.9116	1125.334
0.784	771.9686	1110.157
0.8	768.0256	1094.98
0.816	764.0826	1079.803
0.832	759.942	1063.846
0.848	755.8013	1047.89
0.864	751.6607	1031.934

0.88	747.3214	1015.283
0.896	742.9822	998.6314
0.912	738.6429	981.9803
0.928	734.1033	964.7457
0.944	729.5636	947.5111
0.96	725.024	930.2765
0.976	720.2818	912.598
0.992	715.5396	894.9195
1.008	710.7973	877.2411
1.024	705.85	859.2854
1.04	700.9028	841.3297
1.056	695.9555	823.374
1.072	690.8008	805.3292
1.088	685.6462	787.2844
1.104	680.4916	769.2396
1.12	675.1279	751.3065
1.136	669.7642	733.3734
1.152	664.4005	715.4403
1.168	658.8272	697.8208
1.184	653.2538	680.2013
1.2	647.6805	662.5818
1.216	641.8985	645.4664
1.232	636.1165	628.3511
1.248	630.3345	611.2357
1.264	624.3472	594.7922
1.28	618.3598	578.3488
1.296	612.3725	561.9053
1.312	606.1861	546.2706
1.328	599.9997	530.6359
1.344	593.8133	515.0012

1.36	587.4377	500.2764
1.376	581.062	485.5516
1.392	574.6863	470.8268
1.408	568.1353	457.0764
1.424	561.5842	443.326
1.44	555.0332	429.5757
1.456	548.3253	416.8302
1.472	541.6174	404.0847
1.488	534.9094	391.3392
1.504	528.0679	379.5997
1.52	521.2264	367.8603
1.536	514.3849	356.1208
1.552	507.4378	345.3651
1.568	500.4907	334.6094
1.584	493.5437	323.8537
1.6	486.5235	314.042
1.616	479.5034	304.2303
1.632	472.4833	294.4187
1.648	465.4263	285.4992
1.664	458.3694	276.5798
1.68	451.3124	267.6604
1.696	444.2576	259.5739
1.712	437.2029	251.4875
1.728	430.1482	243.4011
1.744	423.1362	236.0848
1.76	416.1242	228.7685
1.776	409.1122	221.4522
1.792	402.1831	214.8422
1.808	395.254	208.2323
1.824	388.3249	201.6224

1.84	381.5183	195.6564
1.856	374.7117	189.6904
1.872	367.9051	183.7244
1.888	361.2574	178.3425
1.904	354.6096	172.9606
1.92	347.9619	167.5787
1.936	341.5047	162.7247
1.952	335.0475	157.8706
1.968	328.5903	153.0166
1.984	322.3521	148.6382
2	316.114	144.2598
2.016	309.8758	139.8814
2.032	303.8786	135.9308
2.048	297.8814	131.9803
2.064	291.8841	128.0297
2.08	286.1447	124.4632
2.096	280.4052	120.8968
2.112	274.6658	117.3304
2.128	269.1956	114.1083
2.144	263.7254	110.8863
2.16	258.2552	107.6643
2.176	253.0614	104.7508
2.192	247.8675	101.8374
2.208	242.6736	98.92403
2.224	237.7576	96.28722
2.24	232.8415	93.65042
2.256	227.9255	91.01361
2.272	223.2863	88.62487
2.288	218.6471	86.23613
2.304	214.0079	83.84738

2.32	209.6403	81.68094
2.336	205.2728	79.51449
2.352	200.9052	77.34805
2.368	196.8023	75.38086
2.384	192.6993	73.41368
2.4	188.5964	71.44649
2.416	184.7486	69.65804
2.432	180.9008	67.8696
2.448	177.053	66.08115
2.464	173.4497	64.45328
2.48	169.8464	62.82541
2.496	166.2431	61.19755
2.512	162.8727	59.71412
2.528	159.5023	58.23069
2.544	156.1319	56.74725
2.56	152.9823	55.39371
2.576	149.8327	54.04016
2.592	146.6831	52.68662
2.608	143.7418	51.44996
2.624	140.8004	50.2133
2.64	137.859	48.97664
2.656	135.1133	47.8453
2.672	132.3677	46.71396
2.688	129.622	45.58262
2.704	127.06	44.54635
2.72	124.498	43.51007
2.736	121.9361	42.47379
2.752	119.5461	41.52347
2.768	117.1561	40.57315
2.784	114.7661	39.62283

2.8	112.5365	38.75027
2.816	110.307	37.87771
2.832	108.0774	37.00516
2.848	105.9971	36.203
2.864	103.9169	35.40085
2.88	101.8366	34.59869
2.896	99.89543	33.8603
2.912	97.95422	33.1219
2.928	96.01301	32.38351
2.944	94.2014	31.70295
2.96	92.38978	31.0224
2.976	90.57817	30.34185
2.992	88.88705	29.71392
3.008	87.19593	29.08599
3.024	85.5048	28.45806
3.04	83.92538	27.87807
3.056	82.34595	27.29808
3.072	80.76652	26.71809
3.088	79.2904	26.18178
3.104	77.81429	25.64548
3.12	76.33817	25.10917
3.136	74.95825	24.61265
3.152	73.57832	24.11613
3.168	72.1984	23.61962
3.184	70.90805	23.15935
3.2	69.61769	22.69909
3.216	68.32734	22.23882
3.232	67.12035	21.81173
3.248	65.91336	21.38464
3.264	64.70638	20.95755

3.28	63.57612	20.5609
3.296	62.44587	20.16425
3.312	61.31561	19.7676
3.328	60.25688	19.39888
3.344	59.19815	19.03016
3.36	58.13942	18.66143
3.376	57.14605	18.3183
3.392	56.15267	17.97517
3.408	55.1593	17.63203
3.424	54.22808	17.31232
3.44	53.29685	16.9926
3.456	52.36562	16.67289
3.472	51.492	16.37466
3.488	50.61839	16.07642
3.504	49.74478	15.77819
3.52	48.92454	15.4998
3.536	48.10431	15.22141
3.552	47.28408	14.94302
3.568	46.51331	14.68299
3.584	45.74254	14.42296
3.6	44.97177	14.16292
3.616	44.24689	13.91981
3.632	43.522	13.6767
3.648	42.79712	13.43359
3.664	42.11494	13.20605
3.68	41.43277	12.97852
3.696	40.7506	12.75098
3.712	40.10842	12.53781
3.728	39.46624	12.32463
3.744	38.82406	12.11145

3.76	38.21929	11.91154
3.776	37.61452	11.71163
3.792	37.00976	11.51173
3.808	36.43995	11.32413
3.824	35.87014	11.13654
3.84	35.30034	10.94895
3.856	34.7625	10.77281
3.872	34.22467	10.59668
3.888	33.68683	10.42055
3.904	33.17959	10.25503
3.92	32.67235	10.08951
3.936	32.16511	9.923994
3.952	31.68627	9.768298
3.968	31.20743	9.612601
3.984	30.72859	9.456904
4	30.27605	9.310363
4.016	29.82352	9.163822
4.032	29.37098	9.01728
4.048	28.94299	8.879273
4.064	28.51499	8.741267
4.08	28.087	8.60326
4.096	27.68238	8.473158
4.112	27.27776	8.343056
4.128	26.87314	8.212954
4.144	26.48953	8.09023
4.16	26.10592	7.967506
4.176	25.72231	7.844782
4.192	25.35915	7.728906
4.208	24.99599	7.613031
4.224	24.63283	7.497155

4.24	24.28992	7.387584
4.256	23.947	7.278012
4.272	23.60409	7.168441
4.288	23.27894	7.064911
4.304	22.95379	6.961382
4.32	22.62863	6.857852
4.336	22.31971	6.760111
4.352	22.01079	6.66237
4.368	21.70187	6.564628
4.384	21.40906	6.472182
4.4	21.11625	6.379736
4.416	20.82344	6.28729
4.432	20.54525	6.199681
4.448	20.26705	6.112072
4.464	19.98886	6.024463
4.48	19.72488	5.941576
4.496	19.46089	5.85869
4.512	19.19691	5.775803
4.528	18.94279	5.696947
4.544	18.68867	5.61809
4.56	18.43455	5.539234
4.576	18.19784	5.465197
4.592	17.96113	5.391159
4.608	17.72442	5.317122
4.624	17.50112	5.24413
4.64	17.27781	5.171139
4.656	17.05451	5.098148
4.672	16.83824	5.036317
4.688	16.62198	4.974487
4.704	16.40572	4.912657

4.72	16.18383	4.840761
4.736	15.96194	4.768866
4.752	15.74005	4.69697
4.768	15.58639	4.648168
4.784	15.43273	4.599365
4.8	15.27907	4.550563

LAMPIRAN E
PENGARUH VARIASI PARAMETER MONOD
TERHADAP KONSENTRASI SUBSTRAT EFLUEN,
KONSENTRASI BIOMASSA EFLUEN DAN WAKTU
MENUJU *STEADY STATE*

Pada lampiran ini dilakukan variasi parameter Monod seperti K_d , K_s , Y dan μ_{\max} . Dengan dilakukannya variasi parameter-parameter tersebut, kisaran pengaturan plant yang dikatakan baik untuk reaktor UASB dapat ditentukan.

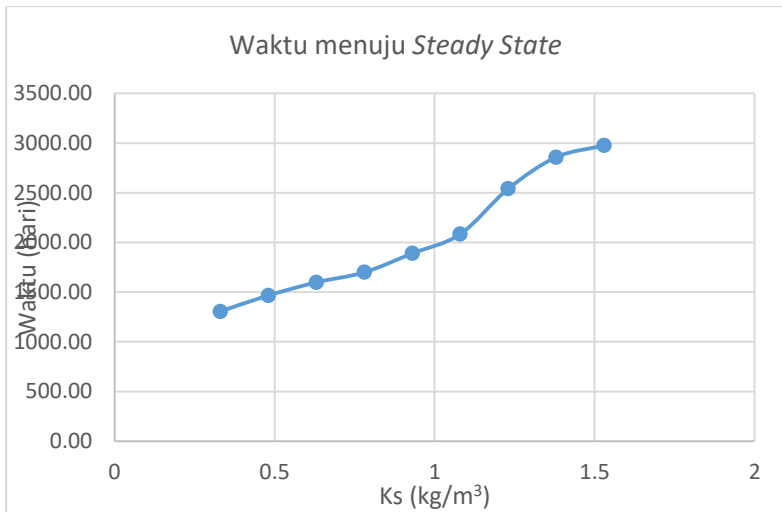
A. Variasi Ks

Tabel 7. Hasil variasi Ks dengan laju aliran influen 153 m³/h

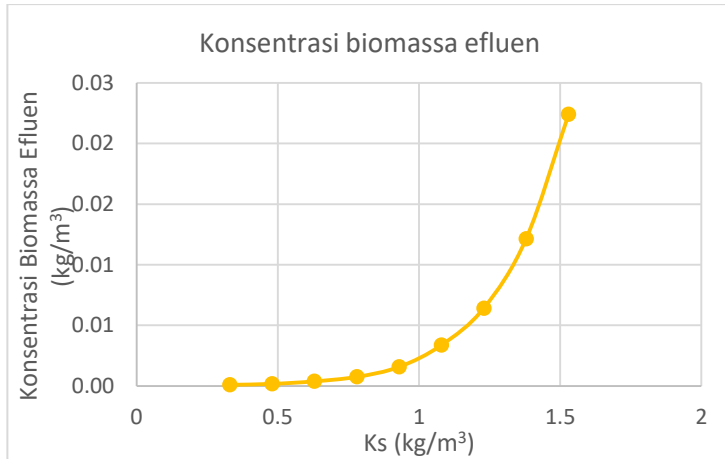
No.	Ks	COD pada HRT	Removal COD pada HRT (%)	Steady State (SS) (hari)	Konsentrasi Substrat Reaktor 1 pada SS (kg/m ³)	COD Removal Reaktor 1 pada SS (%)	COD Efluen pada SS (kg/m ³)	COD Removal efluen pada SS (%)
1	0.33	3.1336	71.51	1304.58	1.718	84.382	0.01835	99.8332
2	0.48	3.3022	69.98	1466.25	2.483	77.427	0.05043	99.5415
3	0.63	3.4582	68.56	1597.92	3.235	70.591	0.09948	99.0956
4	0.78	3.7401	66.00	1699.17	4.673	57.518	0.1652	98.4982
5	0.93	3.807	65.39	1889.58	4.683	57.427	0.2393	97.8245
6	1.08	3.8711	64.81	2083.33	5.363	51.245	0.3464	96.8509
7	1.23	3.9895	63.73	2539.58	6.000	45.455	0.4595	95.8227
8	1.38	4.1049	62.68	2857.50	6.602	39.982	0.5868	94.6655
9	1.53	4.2147	61.68	2976.25	7.160	34.909	0.7279	93.3827

Tabel 8. Hasil variasi Ks terhadap karakteristik biomassa

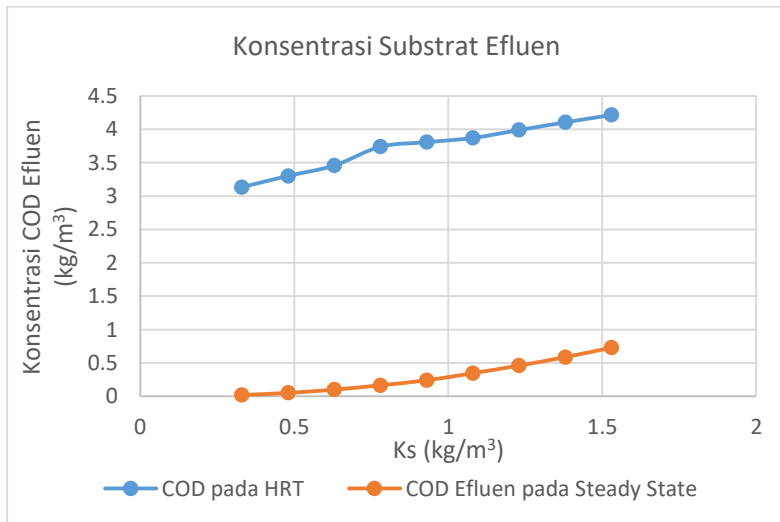
No.	Ks	COD pada HRT	Konsentrasi biomassa Reaktor 1 pada SS (kg/m ³)	Konsentrasi biomassa Reaktor 2 SS (kg/m ³)	Konsentrasi biomassa efluen (kg/m ³)
1	0.33	3.1336	3041	1200	0.000095
2	0.48	3.3022	2794	1327	0.000175
3	0.63	3.4582	2550	1432	0.000384
4	0.78	3.7401	2085	1564	0.000754
5	0.93	3.807	2086	1562	0.001573
6	1.08	3.8711	1861	1594	0.003374
7	1.23	3.9895	1656	1596	0.006421
8	1.38	4.1049	1461	1576	0.012150
9	1.53	4.2147	1281	1532	0.022390



Gambar 1. Pengaruh Ks terhadap Waktu Menuju *Steady State*



Gambar 2. Pengaruh K_s terhadap Konsentrasi Biomassa Efluen



Gambar 3. Pengaruh K_s terhadap Konsentrasi Substrat Efluen

Pada analisis pengaruh parameter K_s terhadap waktu menuju *steady state* diperoleh bahwa semakin besar nilai K_s maka semakin

besar pula waktu yang diperlukan untuk mencapai *steady state*, konsentrasi biomassa efluen dan konsentrasi substrat efluen. Pada waktu mencapai *steady state* dan konsentrasi substrat efluen, seiring dengan peningkatan nilai K_s maka terjadi peningkatan secara linier. Sedangkan pengaruhnya terhadap konsentrasi biomassa efluen diamati bahwa seiring dengan peningkatan nilai K_s , maka konsentrasi biomassa efluen meningkat secara eksponensial. Berdasarkan konsentrasi COD efluen ketika mencapai HRT, diperoleh hasil yang baik (*COD removal* berkisar 70 s.d. 90%) ketika K_s berkisar 0,33 s.d. 1,08 kg/m³.

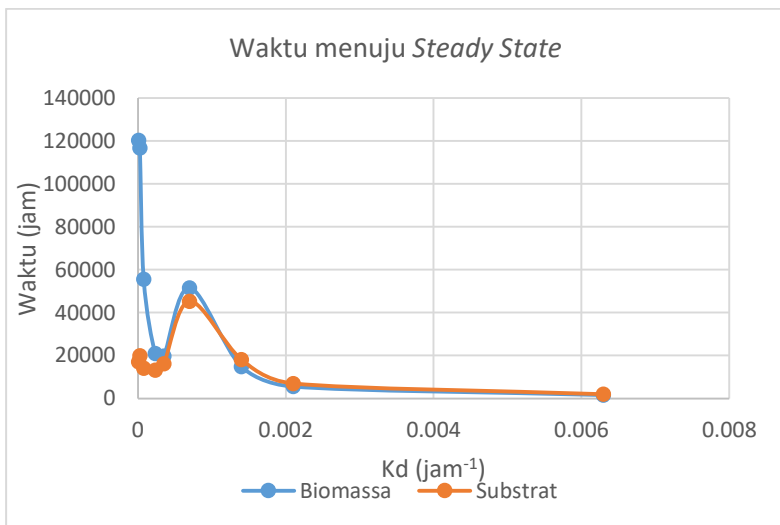
B. Variasi Kd

Tabel 9. Hasil variasi Kd dengan laju aliran influen 153 m³/h

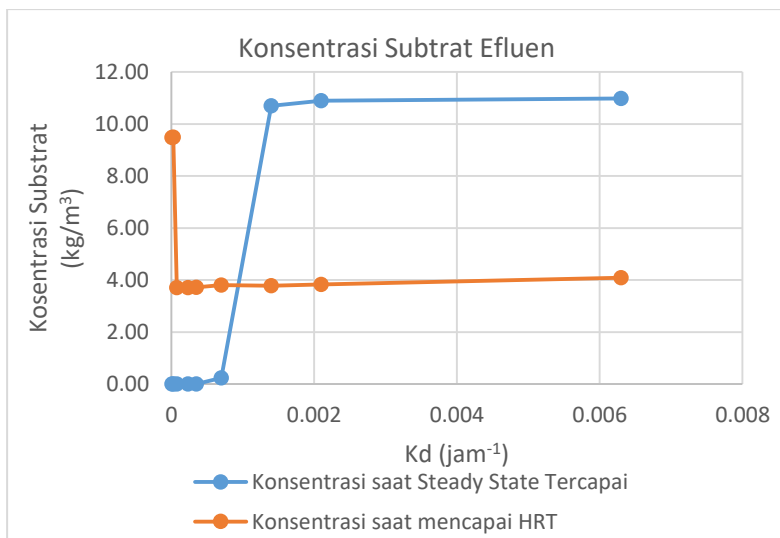
No.	Kd	COD pada HRT	Removal COD pada HRT (%)	SS Biomass (hari)	SS Substrat (hari)	Konsentrasi Substrat Reaktor 1 pada SS (kg/m ³)	COD Removal Reaktor 1 pada SS (%)	COD Efluen pada SS (kg/m ³)	COD Removal efluen pada SS (%)
1	0.0000086	9.4833	13.79	120300	17060	0.2627	0.976118182	5.13E-12	99.999999999953
2	0.0000259	9.4835	13.79	116800	19940	0.2735	0.975136364	5.28E-13	99.999999999955
3	0.0000778	3.7006	66.36	55520	14060	0.3601	0.967263636	1.64E-08	99.999999850909
4	0.0002333	3.7105	66.27	20960	13270	0.6706	0.939036364	0.0001273	99.998842727273
5	0.0003500	3.7179	66.20	19810	16220	1.004	0.908727273	0.003771	99.965718181818
6	0.0007000	3.807	65.39	51620	45350	4.683	0.574272727	0.24	97.824545454546
7	0.0014000	3.7842	65.60	14840	18200	10.81	0.017272727	10.7	2.727272727273
8	0.0021000	3.8281	65.20	5531	6991	10.91	0.008181818	10.89	1.000000000000
9	0.0063000	4.0861	62.85	1576	1970	10.98	0.001818182	10.98	0.181818181818

Tabel 10. Hasil variasi K_d terhadap karakteristik biomassa

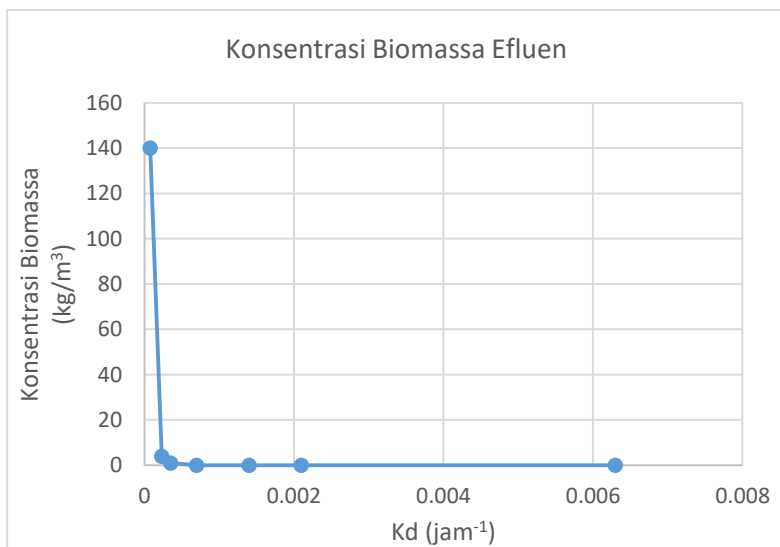
No.	K_d	Konsentrasi biomassa Reaktor 1 pada SS (kg/m ³)	Konsentrasi biomassa Reaktor 2 SS (kg/m ³)	Konsentrasi biomassa efluen (kg/m ³)
1	0.0000086	73540	72230	4.43E+04
2	0.0000259	68000	61250	1.54E+04
3	0.0000778	11030	8385	140.1
4	0.0002333	6949	3678	3.956
5	0.0003500	5318	2464	0.9055
6	0.0007000	2086	1562	0.001573
7	0.0014000	56.77	19.13	0.0005503
8	0.0021000	26.86	0.05491	0.00011
9	0.0063000	6.438	0.2764	0.00000



Gambar 4. Pengaruh K_d terhadap Waktu Menuju *Steady State*



Gambar 5. Pengaruh K_d terhadap Konsentrasi Subtrat Efluen



Gambar 6. Pengaruh K_d terhadap Konsentrasi Biomassa Efluen

Pada analisis pengaruh variasi K_d terhadap waktu menuju *steady state* yang ditunjukkan pada Gambar 4, diperoleh pada nilai K_d yang sangat rendah, maka biomassa akan tetap aktif walaupun substrat telah terdegradasi seluruhnya, sehingga pada K_d yang rendah, diperlukan waktu yang sangat lama untuk mencapai *steady state*. Berikutnya pada nilai K_d yang lebih tinggi, *steady state* cenderung lebih cepat tercapai sebab setelah substrat habis tidak lama kemudian biomassa akan menjadi tidak aktif.

Pada Gambar 5, diperoleh bahwa semakin tinggi nilai konstanta kematian bakteri, maka konsentrasi substrat saat *steady state* tercapai akan semakin tinggi, sedangkan konsentrasi substrat saat HRT akan semakin rendah.

Pada Gambar 6, diperoleh nilai konsentrasi biomassa efluen semakin kecil seiring dengan meningkatnya nilai K_d .

Berdasarkan konsentrasi COD efluen ketika mencapai HRT, diperoleh hasil yang baik (*COD removal* berkisar 70 s.d. 90%) ketika K_d berkisar 0,00035 s.d. 0,0014 kg/m³. Hasil ini juga mempertimbangkan waktu hidup bakteri sebab tidak mungkin nilai K_d pada kondisi aktual terlalu kecil seperti pada variasi.

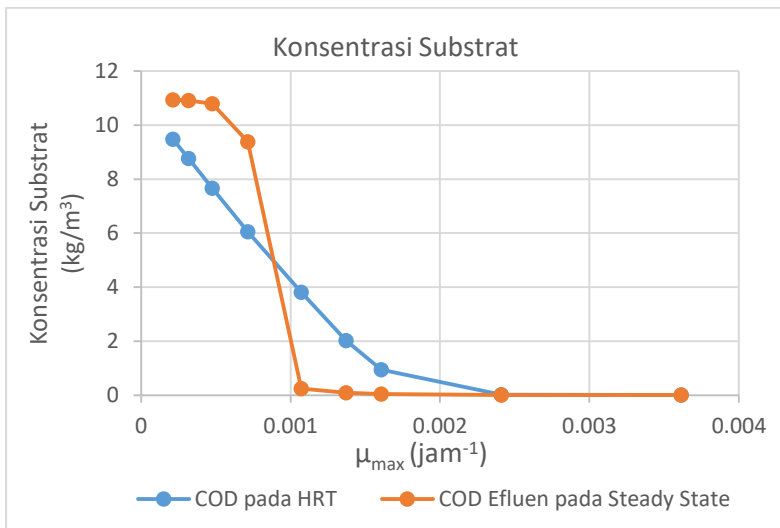
C. Variasi μ_{\max}

Tabel 11. Hasil variasi μ_{\max} dengan laju aliran influen 153 m³/h

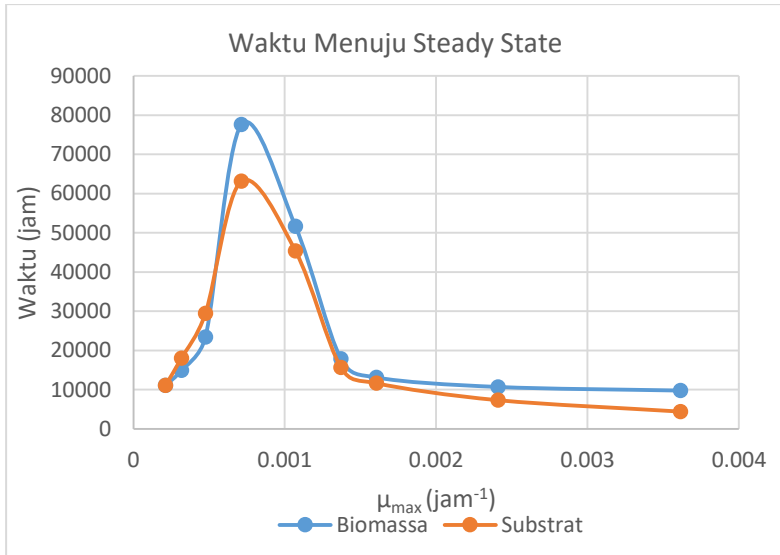
No.	μ_{\max}	COD pada HRT	Removal COD pada HRT (%)	SS Biomass (hari)	SS Substrat (hari)	Konsentrasi Substrat Reaktor 1 pada SS (kg/m ³)	COD Removal Reaktor 1 pada SS (%)	COD Efluen pada SS (kg/m ³)	COD Removal efluen pada SS (%)
1	0.000212	9.4833	0.137881818	11060	11060	10.97	0.002727273	10.94	0.005454545
2	0.000317	8.7677	0.202936364	14940	18040	10.94	0.005454545	10.91	0.008181818
3	0.000476	7.6667	0.303027273	23410	29470	10.89	0.01	10.8	0.018181818
4	0.000714	6.0468	0.450290909	77600	63180	10.69	0.028181818	9.38	0.147272727
5	0.001071	3.807	0.653909091	51620	45350	4.683	0.574272727	0.2393	0.978245455
6	0.001371	2.0175	0.816590909	17870	15680	1.775	0.838636364	0.08354	0.992405455
7	0.001607	0.9482	0.9138	13100	11620	1.187	0.892090909	0.04703	0.995724545
8	0.00241	0.02232	0.997970909	10690	7313	0.5594	0.949145455	0.01048	0.999047273
9	0.003615	0.001563	0.999857882	9767	4403	0.3356	0.969490909	0.003227	0.999706636

Tabel 12. Hasil variasi μ_{\max} terhadap karakteristik biomassa

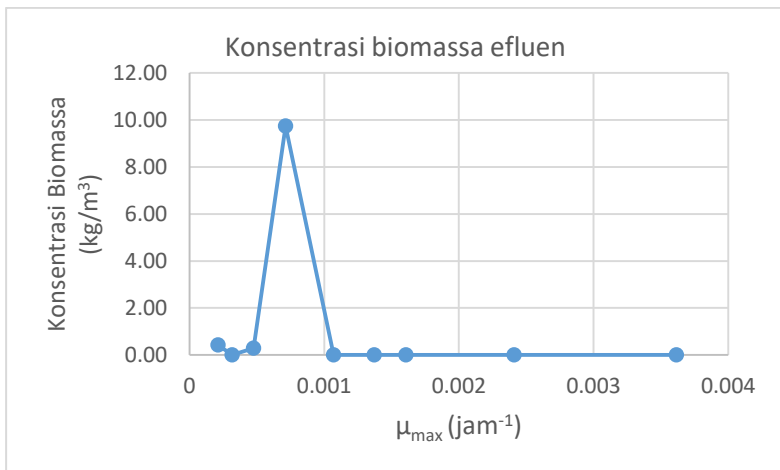
No.	μ_{\max}	Konsentrasi biomassa Reaktor 1 pada SS (kg/m ³)	Konsentrasi biomassa Reaktor 2 SS (kg/m ³)	Konsentrasi biomassa efluen (kg/m ³)
1	0.000212	49.57	14.68	0.4259
2	0.000317	57.35	19.49	0.0005908
3	0.000476	75.12	33.44	0.2816
4	0.000714	139.9	115.5	9.745
5	0.001071	2086	1562	0.001573
6	0.001371	3024	1161	0.0003947
7	0.001607	3212	1062	0.007853
8	0.00241	3417	947.3	0.006891
9	0.003615	3497	898.7	0.003074



Gambar 7. Pengaruh μ_{\max} terhadap Konsentrasi Substrat



Gambar 8. Pengaruh μ_{\max} terhadap Waktu Menuju *Steady State*



Gambar 9. Pengaruh μ_{\max} terhadap Konsentrasi Biomassa Efluen

Berdasarkan konsentrasi COD efluen ketika mencapai HRT, diperoleh hasil yang baik (*COD removal* berkisar 70 s.d. 90%) ketika μ_{\max} berkisar 0,001071 s.d. 0,001371 kg/m³.

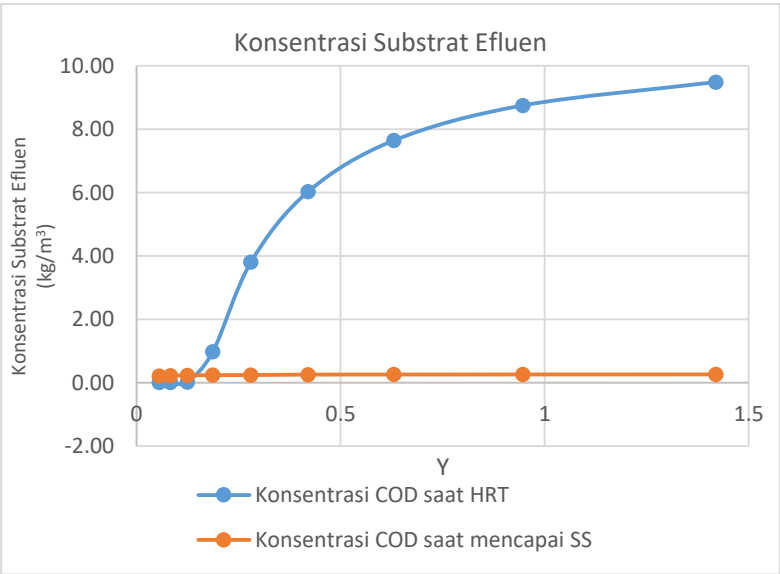
D. Variasi Y

Tabel 13. Hasil variasi Y dengan laju aliran influen 153 m³/h

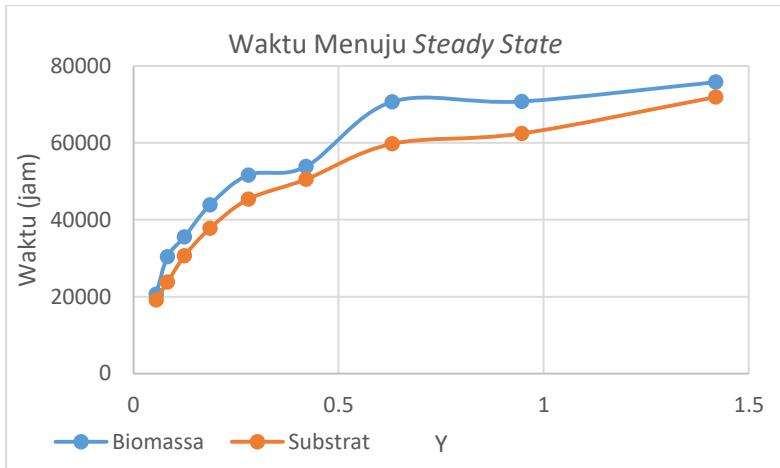
No.	Y	COD pada HRT	Removal COD pada HRT (%)	SS Biomass (hari)	SS Substrat (hari)	Konsentrasi Substrat Reaktor 1 pada SS (kg/m ³)	COD Removal Reaktor 1 pada SS (%)	COD Efluen pada SS (kg/m ³)	COD Removal efluen pada SS (%)
1	0.05540	0.001787	99.984	20640	19170	3.424	68.87272727	0.2067	98.1209
2	0.08310	0.009699	99.912	30410	23770	3.82	65.27272727	0.2216	97.9855
3	0.12465	0.019400	99.824	35570	30590	4.18	62	0.2291	97.9173
4	0.18697	0.074300	91.143	43870	37800	4.46	59.45454545	0.2366	97.8491
5	0.28046	3.807000	65.391	51620	45350	4.683	57.42727273	0.2393	97.8245
6	0.42069	6.031900	45.165	53830	50510	4.861	55.80909091	0.2524	97.7055
7	0.63104	7.649600	30.458	70670	59740	4.98	54.72727273	0.2553	97.6791
8	0.94655	8.753000	20.427	70750	62430	5.087	53.75454545	0.257	97.6636
9	1.41983	9.493200	13.698	75770	71890	5.139	53.28181818	0.2585	97.6500

Tabel 14. Hasil variasi Y terhadap karakteristik biomassa

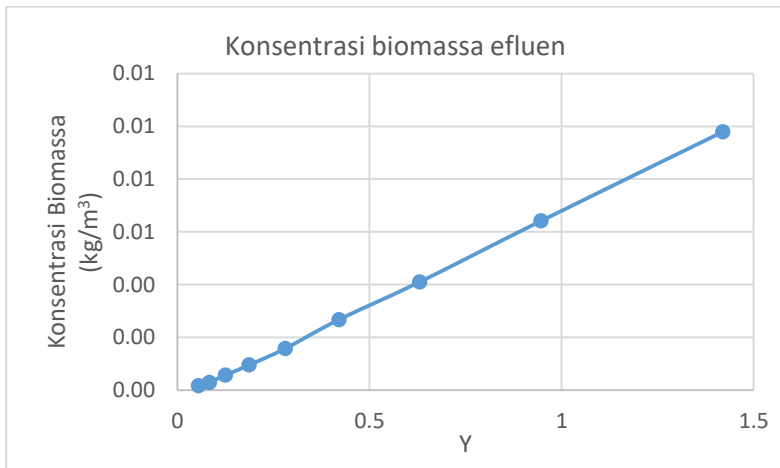
No.	Y	Konsentrasi biomassa Reaktor 1 pada SS (kg/m3)	Konsentrasi biomassa Reaktor 2 SS (kg/m3)	Konsentrasi biomassa efluen (kg/m3)
1	0.05540	521.8	283.2	0.0001597
2	0.08310	726.8	436.1	0.0002921
3	0.12465	1021	670.4	0.0005619
4	0.18697	1452	1026	0.0009489
5	0.28046	2086	1562	0.001573
6	0.42069	3021	2373	0.002671
7	0.63104	4431	3588	0.004101
8	0.94655	6520	5417	0.006412
9	1.41983	9674	8156	0.009791



Gambar 10. Pengaruh Y terhadap Konsentrasi Substrat



Gambar 11. Pengaruh Y terhadap Waktu Menuju *Steady State*



Gambar 12. Pengaruh Y terhadap Konsentrasi Biomassa Efluen

Berdasarkan konsentrasi COD efluen ketika mencapai HRT, diperoleh hasil yang baik (*COD removal* berkisar 70 s.d. 90%)

dengan waktu menuju *steady state* tidak terlalu lama ketika Y berkisar 0,1869 s.d. 0,28046 kg/m³.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIODATA PENULIS



Surya Alam dilahirkan di Tangerang pada 30 April 1995. Penulis merupakan anak ketiga dari 5 bersaudara. Penulis menempuh pendidikan formal di SDK PENABUR Bintaro Jaya, SMPK PENABUR Bintaro Jaya, SMAK PENABUR Bintaro Jaya. Setelah itu melanjutkan pendidikan perguruan tingginya di Jurusan Teknik Fisika Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya angkatan 2013. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di kegiatan akademik maupun non akademik. Dalam bidang akademik, penulis aktif menjadi Asisten Laboratorium Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan (2014 s.d. 2017), Asisten Mata Kuliah Termodinamika (2016). Sedangkan dalam bidang non akademik, penulis aktif di Himpunan Mahasiswa Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri, ITS (HMTF, FTI-ITS) sebagai Staff Departemen Riset dan Teknologi (2014/2015), Koordinator *SNOW EPW* (2014/2015), Ketua Dewan Perwakilan Angkatan (2015/2016), Staff Divisi Pemuridan PMK ITS (2015/2016), Koordinator Sie. Pembinaan Pembinaan Mahasiswa Baru Kristen (PKMBK) (2015/2016) dan Koordinator Steering Committee PKMBK (2015/2016). Saat ini penulis bertempat tinggal di Tangerang Selatan, dan memiliki alamat e-mail: suryaalamsantoso30@gmail.com.